

September 2022



Fud-program 2022

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

ISSN 1104-8395

ID 1990062

September 2022

Fud-program 2022

Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall

Svensk Kärnbränslehantering AB

Denna rapport är publicerad på www.skb.se

© 2022 Svensk Kärnbränslehantering AB

Förord

Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, som ägs av de företag som driver de svenska kärnkraftverken har till uppgift att ta hand om kärnavfallet och det använda kärnbränslet från kärnkraftsreaktorerna. Enligt kärntekniklagen ska tillståndshavarna till reaktorerna vart tredje år upprätta ett allsidigt program för den forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla kärnkraftverken. Tillståndshavarna har genom avtal delegerat till SKB att utarbeta dessa Fud-program och lämna in dem till Strålsäkerhetsmyndigheten. Här presenterar SKB Fud-program 2022 som tagits fram i samverkan med kärnkraftsföretagen.

Under den gångna Fud-perioden har ett flertal viktiga milstolpar uppnåtts. I december 2021 beslutade Sveriges regering att ge SKB tillstånd att bygga ut slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, i Forsmark i Östhammars kommun. Anläggningen behöver bli större så att rivningsavfallet från de svenska kärnkraftverken ska få plats. I januari 2022 beslutade regeringen att ge SKB tillstånd att uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark och en inkapslingsanläggning i Oskarshamns kommun och bedömde att den ansökta verksamheten om ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle, uppfyller kraven på val av metod och bästa möjliga teknik. Det senare är ett historiskt regeringsbeslut som ger SKB möjlighet att slutförvara det kärnavfall som vår generation har skapat. Regeringens beslut om utökad mängd använt kärnbränsle för mellanlagring i Clab från 8 000 till 11 000 ton fattades i augusti 2021, efter att regeringen hade brutit ut SKB:s ansökan om detta från den inlämnade ansökan om ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle. Regeringsbesluten ger nu Sverige förutsättningar för en heltäckande hantering och slutförvaring av Sveriges använda kärnbränsle och radioaktiva avfall.

I Fud-program 2022 presenterar SKB ett systemövergripande perspektiv av verksamheten samt den planerade forskningen och teknikutvecklingen. Den strategiska inriktningen har tagits ett steg längre i förhållande till föregående Fud-program. Det är av betydelse för etableringen av hela avfallssystemet att aktiviteter genomförs i en logisk följd, där hänsyn tas till behov och beroenden, vilket avspeglas i handlingsplanens aktivitets- och milstolpeplan, där relationer mellan aktiviteter och milstolpar för anläggningarna är i fokus. Vidare är det SKB:s uppfattning att fokus flyttas och omfattningen av Fud-programmet minskar när planerade anläggningar övergår till tillståndsgivna anläggningar under tillsyn av SSM. Detta samtidigt som redovisningen ska innehålla en översikt av alla aktiviteter och verksamheter nödvändiga för att ge en tillräcklig förståelse för helheten. De erhållna regeringsbesluten innebär att mark- och miljödömsstolen kan utfärda miljötillstånd och föreskriva villkor enligt miljöbalken och att Strålsäkerhetsmyndigheten gör en fortsatt stegvis prövning.

SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration innefattar bland annat Äspölaboratoriet. SKB planerar att vara klar med försöken i Äspölaboratoriets undermarksdel under innevarande Fud-period och de långtidsförsök som fortfarande pågår kommer att kunna avslutas under 2024. Kvarstående test och prövning i undermarksmiljö bedöms kunna genomföras i samband med uppförandet av slutförvaret för använt kärnbränsle i Forsmark.


SKB har arbetat med forskning och teknikutveckling i över 40 år och SKB:s omfattande kunskapsutbyte inom forskarvärlden i stort och mellan systerorganisationer i synnerhet har skapat en ovärderlig internationell kunskapsbank om omhändertagande av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. SKB:s öppna, kunskapsorienterade och samarbetsinriktade förhållningssätt har bidragit till internationellt erkännande av KBS-3-metoden för geologisk slutförvaring av kärnbränsle. Förutom i Sverige används nu forsknings- och teknikutvecklingsresultaten även i andra länder, främst i Finland.

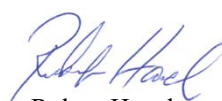
SKB firar 50 år och går samtidigt in i en ny fas med en stark beställarorganisation för att omsätta regeringsbesluten och uppföra nya anläggningar. SFR ska byggas ut för att kunna ta emot drift- och rivningsavfall från kärnkraftsreaktorer under avveckling. Därefter ska en inkapslingsanläggning uppföras för inkapsling av det använda kärnbränslet och Kärnbränsleförvaret uppföras för slutlig deponering av kapslarna. För detta behövs samtidigt produktionsanläggningar för kapslar och buffertmaterial. Den sista kärntekniska anläggningen som SKB kommer att uppföra är Slutförvaret för långlivat avfall, SFL, vilken behövs för att avvecklingen av de svenska kärnkraftverken ska kunna slutföras. Sedan redovisningen av Fud-program 2019 har två reaktorer ställts av, Ringhals 1 och Ringhals 2. Nu pågår avveckling av sju reaktorer, medräknat Ågestareaktorn som började avvecklas under 2020. SFR-utbyggnaden har högst prioritet bland de slutförvarsanläggningar som behöver uppföras. Redan i slutet av 2022 sker villkorsförhandling hos mark- och miljödömsstolen varefter en ansökan inför uppförande inlämnas till Strålsäkerhetsmyndigheten. När dom har meddelats och godkännande av den preliminära säkerhetsanalysen erhållits kan utbyggnaden av SFR påbörjas.

SKB fortsätter nu arbetet med att förverkliga Sveriges största miljöskyddsprojekt och genom vårt uppdrag bidrar vi till ett fossilfritt samhälle inom en generation.

Stockholm i september 2022
Svensk Kärnbränslehantering AB


Johan Dasht
Vd


Anders Ström
Beställare


Robert Havel
Projektledare

Sammanfattning

Den svenska kraftindustrin har under mer än ett halvt sekel producerat elektricitet med kärnkraft. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) ansvarar på uppdrag av sina ägare för hantering och slutförvaring av kärnavfallet och det använda kärnbränslet. Fud-program 2022 syftar till att svara upp mot kravet på att redovisa den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för att utveckla och implementera återstående verksamheter som anges i kärntekniklagen (KTL). I programmet presenteras planerna för att genomföra de återstående delarna av avfallssystemet för kärnavfall och använt kärnbränsle samt för att utveckla kärnkraftsreaktorerna. Den verksamhet som SKB bedriver inom ramen för ett givet tillstånd redovisas mer övergripande.

Det svenska avfallssystemet

Nedan avsnitt syftar till att ge en systemövergripande förståelse för det svenska avfallssystemet. De anläggningar och det transportsystem som behövs för att reaktorinnehavarna ska kunna uppfylla sina skyldigheter enligt gällande lagstiftning beskrivs i programmet liksom den planering som pågår för att färdigställa ännu ej driftsatta delar av avfallssystemet.

Det är driften och avvecklingen av kärnkraftverken som, förutom konventionellt avfall, ger upphov till kärnavfall och använt kärnbränsle vilket behöver hanteras så att människor och miljön skyddas mot skadlig verkan av joniserande strålning. Beroende på hur skadlig strålningen är, behöver avfallet hanteras på olika sätt.

Det använda kärnbränslet måste hanteras med omfattande strålskydd, och fram tills att det ska slutförvaras är det placerat i ett Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab) där det lagras i vatten som både avskärmar strålningen och kyler bort resteffekten. Det använda bränslet kommer att kapslas in i kopparkapslar i en inkapslingsanläggning, som ska uppföras i anslutning till Clab. Inkapslingsanläggningen och Clab kommer därefter att drivas som en Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle (Clink). Kapslarna ska placeras djupt ner i berggrunden i ett slutförvar, Kärnbränsleförvaret, med naturliga och tillverkade barriärer och förhållanden som uppfyller kraven på säkerhet efter förslutning.

Kärnavfallet, som består av både kortlivat och långlivat radioaktivt avfall, ska även det deponeras i geologiska slutförvar. Det kortlivade i Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) och det långlivade avfallet kommer att placeras i det planerade Slutförvaret för långlivat avfall (SFL). Utöver i de geologiska slutförvaren, kan en delmängd av avfallet med mycket låg aktivitetsnivå deponeras i markförvar, placerade i direkt anslutning till kärntekniska anläggningar. Visst avfall kan behandlas så att de radioaktiva delarna separeras ut och resten friklassas. Vid avveckling av ett kärnkraftverk kan exempelvis metall efter viss behandling smältas ner, friklassas och återanvändas. Det som återstår blir en mindre volym radioaktivt avfall som behöver deponeras i SFR eller SFL. Innan slutförvaren har tagits i drift mellanlagras avfallet på olika platser där annan kärnteknisk verksamhet bedrivs.

För all hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle, såväl inom en anläggning som mellan anläggningar, behövs hanteringsstationer och ett transportsystem. Transportsystemet är avgörande för avfallssystemets funktion, och omfattar bland annat fordon för marktransporter, fartyg och olika typer av transportbehållare. Utrustning i anläggningarna behöver vara konstruerad så att alla avfallsbehållare med avfall, vilka transporteras i anpassade avfallstransportbehållare, som ska placeras i slutförvar kan hanteras på ett strålsäkert sätt. Vid utformningen av en avfallsbehållare tas därför hänsyn till materialval, strålningsmiljön i mellanlagrings- och slutförvarsanläggningar, täthet, hanterbarhet i berörda anläggningar, transporterbarhet, påverkan på aktuellt slutförvars långsiktiga säkerhet och det avfall och annat material som behållaren ska fyllas med. När alla acceptanskriterier är uppfyllda kan avfallsbehållaren deponeras i avsett slutförvar.

Kapslarna, som det använda kärnbränslet ska placeras i måste vara täta för att förhindra uttransport av radioaktiva ämnen. Kapslarna består av ett kopparhölje och en insats som har fack för varje enskilt bränselement. För att bli täta försluts de genom att kopparlock svetsas på. För kapseltransporter mellan Clink i Oskarshamn och Kärnbränsleförvaret i Forsmark behöver det finnas en särskild strålskärmad transportbehållare.

Fud-program 2022

I Fud-program 2022 presenterar SKB tillsammans med tillståndshavarna för de svenska kärnkraftsreaktorerna sina planer för forskning, utveckling och demonstration under perioden 2023–2028.

Programmet består av tre delar:

- Del I Verksamhet och handlingsplan.
- Del II Avfall och slutförvaring.
- Del III Utveckling av kärntekniska anläggningar.

Del I Verksamhet och handlingsplan

I del I beskrivs verksamheten och handlingsplanen för att ta hand om och slutförvara använt kärnbränsle och kärnavfall från driften och utvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna. Där anges också prioriteringar och motiv till den forskning, utveckling och demonstration som behövs för att kunna uppföra och ta nya anläggningar i drift.

De anläggningar i avfallssystemet som är i drift idag är Clab, SFR och lokala markförvar vid kärnkraftverken. Dessutom äger SKB ett fartyg med tillhörande transportbehållare och fordon. För slutförvaring av det använda kärnbränslet, KBS-3-systemet, återstår att bygga och driftsätta en ny anläggningsdel i anslutning till Clab för inkapsling av det använda kärnbränslet (tillsammans kallat Clink), att utveckla behållare för transport av kapslar med använt kärnbränsle och att uppföra ett slutförvar för kapslar med använt kärnbränsle, Kärnbränsleförvaret. Förutom dessa anläggningar behövs ett system för produktion av kapslar och ett för produktion av buffert- och återfyllningskomponenter.

För omhändertagande av det låg- och medelaktiva drift- och rivningsavfallet behöver kapaciteten i mellanlager utökas och SFR byggas ut. Det pågår även utveckling av transportbehållare. SFL behöver lokaliseras till en lämplig plats och byggas, och behållare för transporter av långlivat avfall till detta förvar behöver tillverkas och införskaffas.

Utveckling av kärnkraftsreaktorer pågår eller planeras på flertalet av de svenska kärnkraftverken och Fud-programmet beskriver planeringen för de reaktorer som ska utvecklas på 2020-talet.

Plan för genomförande

I detta Fud-program har den strategiska inriktningen tagits ett steg längre i förhållande till föregående Fud-program. Det är av strategisk betydelse för etableringen av hela avfallssystemet att aktiviteter genomförs i en logisk följd, där hänsyn tas till behov och beroenden. För att kärnkraftsreaktorerna ska kunna vara i drift behöver det finnas tillgängligt utrymme för att mellanlagra det använda kärnbränslet. När det gäller anläggningar som utvecklas behöver det finnas mellanlager för avfallet innan nödvändiga slutförvar har uppförts. Dessa och andra beroenden avspeglas i aktivitets- och milstolpeplanen, där fokus ligger på att ge ett systemövergripande perspektiv och peka på relationer mellan aktiviteter och milstolpar för anläggningarna.

SKB:s verksamhet planeras långsiktigt utifrån genomförandeplanen i Fud-programmet, som omfattar samtliga anläggningar ända tills de utvecklas, och utifrån operativa femårsplaner som uppdateras varje år. Planeringsdirektiv baserat på kända förutsättningar samt strategiska mål utgör grunden för dessa planer. Säker drift av SKB:s anläggningar har högsta prioritet och vid eventuella resurskonflikter ges alltid förtur till detta.

Eftersom SKB:s verksamhet är beroende av extern inverkan, så som beslut från reaktorinnehavarna eller från myndigheter, behövs en flexibilitet för omplanering. Verksamheten måste kunna anpassas till händelser i omvärlden. De avställda reaktorerna i Ringhals och Oskarshamn har inneburit ett

ökat behov av transporter av använt kärnbränsle från dessa reaktorer till Clab. Detta tillsammans med de sedan tidigare avställda reaktorerna i Barsebäck gör att även behovet av omhändertagande av radioaktivt avfall från avvecklingen har ökat. Behovet av att så snart som möjligt kunna ta ett utbyggt SFR i drift har därmed ökat.

SKB har under den gångna Fud-perioden erhållit viktiga regeringsbeslut för utökad lagring i Clab, och utbyggnaden av SFR samt avseende KBS-3-systemet, vilka innebär att betydande milstolpar har passerats. Tillståndsärendena med koppling till KTL och miljöbalken (MB) fortsätter och kommer att pågå under flera år framöver. Hur lång tid varje ärende tar innan verkställighetsbeslut fattats eller dom meddelats kan inte anges på förhand, utan kräver flexibilitet i SKB:s planering.

Inom Fud-perioden kommer utökad lagring i Clab och utbyggnaden av SFR att ha hög prioritet, främst för att säkerställa fortsatt drift av reaktorer och för att kunna hantera avfall från de reaktorer som är under avveckling.

Det fortsatta arbetet med SFL har fått lägre prioritet. Under Fud-perioden ligger fokus på arbete med inventariet, preliminära acceptanskriterier och utredningar om avfallsbehållare. När alla nödvändiga data finns tillgängliga för inventariet, vilket även omfattar data för det historiska avfallet som ska slutförvaras där, kommer de att utgöra grunden för en analys av säkerheten efter förslutning och förutsättning finns då för att kunna ansöka om tillstånd och tillåtlighet för slutförvaret. Sammantaget innebär detta, tillsammans med att arbetet med SFL fått lägre prioritet, att byggstarten för SFL flyttas fram flera år jämfört med vad som redovisades i Fud-program 2019.

Forskning och utveckling

SKB:s och tillståndshavarnas planering av framtida forsknings- och utvecklingsinsatser för slutförvaren utgår från handlingsplanen där den stegvisa beslutsprocessen utgör grund för viktiga milstolpar. De milstolpar som är kopplade till beslutsstegen i form av ansökningar och säkerhetsredovisningar styr när kunskap och utveckling av teknik behöver ha nått en viss nivå, medan Strålsäkerhetsmyndighetens (SSM) godkännanden styr när SKB kan påbörja uppförande respektive drift av anläggningar. När SKB lämnar in ansökningarna för att få bygga en anläggning är syftet att visa att kunskap och förmåga finns för att uppföra den så att den uppfyller myndigheternas krav.

SKB:s forsknings- och teknikutvecklingsinsatser fortsätter för att möjliggöra optimering av främst Kärnbränsleförvarets utformning, men också för att minska osäkerheter i analyserna av säkerhet efter förslutning genom att bidra till ökad förståelse för de processer som påverkar slutförvaren och dess barriärer och genom förbättrade modeller. När det gäller teknikutvecklingen fortsätter arbetet med att utveckla metoder och tekniska lösningar för att nå tillräcklig mognadsgrad inom respektive område inför implementering. I del I, Verksamhet och handlingsplan beskrivs de viktigaste kvarstående forsknings- och utvecklingsfrågorna översiktligt. De planerade insatserna under Fud-perioden redovisas mer utförligt i del II, Avfall och slutförvaring.

I del I redovisas även de avslutande arbeten som planeras att göras i Äspölaboratoriet innan undermarksdelen av anläggningen stängs. Vidare beskrivs planeringsarbetet avseende hur övervakning av Kärnbränsleförvaret ska ske under uppförande och drift, arbetet med frågor om bevarande av kunskap och information om slutförvaren efter förslutning samt SKB:s syn på Fud-programmets roll för öppenhet och insyn i forsknings- och utvecklingsfrågor.

Del II Avfall och slutförvaring

I del II presenteras behovet av fortsatt forskning, utveckling och demonstration under Fud-perioden för de frågor som SKB identifierat som prioriterade för den fortsatta hanteringen och slutförvaringen av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. Nuläge och program presenteras för följande områden; det låg- och medelaktiva avfallet, det använda kärnbränslet, förvarens tekniska och naturliga barriärer, ytekosystemet samt klimatet. Vissa delar av forskningen och teknikutvecklingen berör alla tre slutförvaren och beskrivs integrerat för dem. I nulägesbeskrivningarna av kunskapsläget finns hänvisningar till underlagsrapporter med mer detaljerad redovisning. Presentationen av de prioriterade forsknings- och teknikutvecklingsinsatserna under Fud-perioden redovisas som punktsatser i programavsnitten. För tillståndsgiven verksamhet kommer resultat från pågående forskning och teknikutveckling att redovisas i mer detalj i den stegvisa prövningen enligt KTL för respektive anläggning.

Behovet av forsknings- och utvecklingsinsatser kan delas in i tre grupper:

- Ökad processförståelse, det vill säga den vetenskapliga förståelsen för processer som påverkar slutförvarssystemet och därmed grunden för att bedöma deras betydelse för säkerheten efter förslutning.
- Kunskap och kompetens kring utformning, konstruktion, tillverkning och installation av de barriärer och komponenter som ska användas i anläggningarna.
- Kunskap och kompetens kring kontroll och provning för att verifiera att systemets barriärer och komponenter uppfyller kraven.

Nedan redovisas de viktigaste forsknings- och utvecklingsinsatserna inom respektive grupp för vart och ett av de tre slutförvaren.

Utbyggnaden av Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall

Utbyggnaden av SFR grundar sig på regeringens tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB. Mark- och miljödomstolen (MMD) utfärdar miljötillstånd och beslutar om villkor enligt MB. SSM kommer att bedriva tillsyn under de stegvisa prövningarna. Under Fud-perioden kommer SKB att färdigställa den preliminära säkerhetsredovisningen (PSAR) och lämna in den till SSM för granskning och godkännande. SKB:s forsknings- och teknikutvecklingsinsatser kommer att vara inriktade på framtagning av underlag för säkerhetsredovisningen (SAR) för SFR provdrift.

Processförståelse och modellering

- Uppdatering av radionuklidinventariet i låg- och medelaktivt avfall (även relevant för SFL).
- Öka processförståelsen för sorption av radionuklider på cementmaterial samt nedbrytning av utvalda organiska material till potentiella komplexbildare (även relevant för SFL).
- Vidareutveckling av modelleringsverktyg för transport av lösta ämnen framför allt när det gäller matrisdiffusion och sorption i både geosfär och ytekosystem (även relevant för Kärnbränsleförvaret).

Tillverkning och installation

- Viss teknikutveckling av barriärerna och förslutningskomponenter i syfte att verifiera krav och konstruktionsförutsättningar.
- Anpassning av förslutningsteknik för undersökningsborrhål vid SFR.
- Utformning av betongkonstruktioner med inriktning på produktionsmetoder.

Kontroll och provning

- Framtagning av preliminära acceptanskriterier.

Kärnbränsleförvaret och Clink

Uppförandet av Kärnbränsleförvaret, vilket liksom Clink ingår i KBS-3-systemet, grundar sig på regeringens tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB. MMD utfärdar miljötillstånd och beslutar om villkor enligt MB. SSM kommer att bedriva tillsyn under de stegvisa prövningarna. Under Fud-perioden kommer SKB att färdigställa PSAR för Kärnbränsleförvaret, PSAR för Clink (som utgör förutsättning för att få börja bygga) och lämna in dem till SSM för granskning och godkännande. SKB:s forsknings- och teknikutvecklingsinsatser under Fud-perioden är inriktade på framtagning av underlag för SAR inför provdrift av Kärnbränsleförvaret och Clink.

Processförståelse och modellering

- Verifiera och vidareutveckla den platsspecifika modellen för Forsmark med hjälp av ett detaljundersökningsprogram för att identifiera nödvändiga aktiviteter och åtgärder.
- Vidareutveckling av modell som kan användas för att beräkna det använda kärnbränslets upplösningshastighet.
- Studie kring sulfidkorrosionsprocessen för koppar i en omättad bentonitbuffert.
- Fortsatta studier kring bentonitförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion.
- Utveckling av modell för sekundärrörelser i bergets sprickor vid jordskalv.
- Vidareutveckling av modelleringsverktyg för transport av lösta ämnen framför allt när det gäller matrisdiffusion och sorption i både geosfär och ytekosystem (även relevant för SFR).

Tillverkning och installation

- Vidareutveckling av tekniska system för deponering och återfyllning.
- Fortsatt utveckling och optimering av tillverkningsmetoder och konstruktion av kapseln och dess komponenter.
- Utveckla metoden för förslutning av undersökningsborrhål för flacka och horisontella hål.

Kontroll och provning

- Framtagning av övervakningsprogram för uppförande och drift av Kärnbränsleförvaret.

Slutförvaret för långlivat avfall

SFL är det sista slutförvaret som SKB planerar att uppföra. Tillståndsansökningar enligt KTL och MB planeras att lämnas in under 2030-talet och omfattar då en förberedande PSAR. Förutom de frågor som är gemensamma för de olika förvararna är SKB:s forsknings- och teknikutvecklingsinsatser för SFL under Fud-perioden inriktade på arbete med inventariet, utveckling av avfallsbehållare samt framtagning av preliminära acceptanskriterier.

Processförståelse och modellering

- Uppdatering av radionuklidinventariet i låg- och medelaktivt avfall (även relevant för SFR).
- Öka processförståelsen för sorption av radionuklider på cementmaterial samt nedbrytning av utvalda organiska material till potentiella komplexbildare (även relevant för SFR).

Tillverkning och installation

- Utveckling av avfallsbehållare.

Kontroll och provning

- Framtagning av preliminära acceptanskriterier.

Del III Avveckling av kärntekniska anläggningar

I del III presenteras planeringen för avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna och SKB:s kärntekniska anläggningar.

Tillståndshavaren för en kärnteknisk anläggning har ansvaret för avvecklingen av anläggningen enligt KTL, strålskyddslagen, finansieringslagen och SSM:s föreskrifter. För det radioaktiva avfallet sträcker sig ansvaret tills att det är friklassat eller tills att regeringen beslutat om befrielse från ansvar enligt KTL.

Inför avveckling måste erforderliga tillstånd finnas. Enligt KTL och strålskyddslagen samt gällande förordningar, tillståndsvillkor och föreskrifter ska bland annat följande dokument utarbetas inför och i vissa fall löpande under driften och under avvecklingen: avvecklingsplan och avvecklingsstrategi, avfallsplan, SAR, underlag enligt Euratomfördragets artikel 37, delmoment- eller delprojektanmälan, avvecklingsrapport samt kontrollprogram för friklassning.

När anläggningen/anläggningsdelarna friklassats kan konventionell rivning och återställning av mark genomföras.

Tidsplaner för avvecklingen av de svenska kärnkraftverken styrs av de planerade drifttiderna för kärnkraftverken. Reaktorinnehavarnas planering är att starta nedmontering och rivning så snart som möjligt efter slutlig avställning där förutsättningar såsom tillgänglighet av mellanlager och slutförvar för rivningsavfall påverkar planeringen.

För att effektivisera arbetet med avvecklings- och avfallsfrågor har arbetsområden fördelats mellan de olika aktörerna på såväl företagsnivå som på koncernnivå. Tillståndshavarna avvecklar sina kärnkraftsreaktorer och SKB:s huvuduppgift är att få till stånd slutförvar för rivningsavfall enligt tillståndshavarnas behov. SKB genomför också transporter av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle från kärnkraftverken till mellanlager och slutförvar.

Avveckling av kärntekniska anläggningar i Sverige kommer att pågå ända fram till 2070-talet, då anläggningarna för omhändertagande av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall ska avvecklas. Avvecklingsverksamheten kommer att genomföras i tre huvudsakliga etapper; en på 2020-talet, en på 2040-talet och den slutliga på 2070-talet. Den första etappen omfattar Barsebäck 1, Barsebäck 2, Oskarshamn 1, Oskarshamn 2, Ringhals 1, Ringhals 2 och Ågesta.

Innehåll

1	Introduktion	19
1.1	Förutsättningar	19
1.1.1	Gällande regelverk och SKB:s uppdrag	19
1.1.2	Grundläggande principer	20
1.1.3	Reaktorernas planerade drifttider	22
1.1.4	Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet	22
1.1.5	Tillståndsprövning för kärntekniska anläggningar	23
1.2	Program för forskning, utveckling och demonstration	25
1.2.1	Fud-program 2019	25
1.2.2	Milstolpar och utveckling sedan Fud-program 2019	25
1.2.3	Fud-program 2022	26
1.3	Finansiering	27
2	Beskrivning av avfallssystemet	29
2.1	Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall	29
2.1.1	Anläggningar för kortlivat avfall	29
2.1.2	Anläggningar för långlivat avfall	32
2.2	Anläggningar inom KBS-3-systemet för använt kärnbränsle	34
2.3	Transportsystemet	37
2.4	Kärnämneskontroll	38
3	Plan för genomförande	39
3.1	Genomförandeplan för kärnavfallsprogrammet	39
3.2	Planeringen för låg- och medelaktivt avfall	40
3.2.1	Övergripande planering	40
3.2.2	Kortlivat avfall	40
3.2.3	Långlivat avfall	43
3.3	Planeringen för använt kärnbränsle	45
3.3.1	Övergripande planering	46
3.3.2	Mellanlagring	46
3.3.3	Inkapsling	47
3.3.4	Slutförvaring	48
3.4	Planeringen för mycket lågaktivt avfall	49
3.5	Genomförandeplan för avveckling av kärntekniska anläggningar	50
3.5.1	Översikt avveckling	50
3.5.2	Nuläge och övergripande planering	50
3.6	Genomförandeplan för transporter	52
3.6.1	Övergripande planering	52
3.6.2	Transport av låg- och medelaktivt avfall	52
3.6.3	Transport av använt kärnbränsle	53
3.6.4	Specialtransporter	53
3.7	Handlingsalternativ vid förändrade förutsättningar	53
3.7.1	Kärnkraftsreaktorernas drifttider	54
3.7.2	Driftsättning av utbyggt SFR	55
3.7.3	Slutförvaring av mycket lågaktivt rivningsavfall	55
3.7.4	Lokalisering av plats för och driftsättning av SFL	56
3.7.5	Driftsättning av Kärnbränsleförvaret och Clink	56
4	Fortsatt forskning och utveckling	57
4.1	Planerade insatser för respektive slutförvar och Clink	57
4.1.1	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall – SFR	58
4.1.2	Slutförvaret för långlivat avfall – SFL	59
4.1.3	Kärnbränsleförvaret och Clink	60
4.2	Planerade insatser för låg- och medelaktivt avfall	61
4.2.1	Processer kopplade till materialegenskaper	62
4.2.2	Radionuklidinventarium	62

4.2.3	Acceptanskriterier för avfall i SFL och det utbyggda SFR	62
4.2.4	Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare	62
4.3	Planerade insatser för använt kärnbränsle	63
4.3.1	Bränsleintegritet, bränslekaraktisering och bränsleinformation	63
4.3.2	Kriticitet, strålning och kärnämneskontroll	63
4.3.3	Bränsleupplösning, radionuklidspeciering och lösligheter	64
4.4	Planerade insatser för kapsel för använt kärnbränsle	64
4.4.1	Processförståelse	64
4.4.2	Konstruktion	65
4.4.3	Tillverkning, kontroll och provning	65
4.5	Planerade insatser för cementbaserade material	65
4.5.1	Processförståelse	65
4.5.2	Utformning av betongkonstruktioner och material	66
4.6	Planerade insatser för lerbarriärer och förslutning	66
4.6.1	Processförståelse	66
4.6.2	Utformning av barriärer samt tillverkning, kontroll och provning	67
4.6.3	Installation av buffert och återfyllning	68
4.6.4	Förslutning av borrhål och förvar	68
4.7	Planerade insatser för berg	68
4.7.1	Karaktisering och modellering av bergets egenskaper	68
4.7.2	Modellering av diskreta spricknätverk	69
4.7.3	Seismisk påverkan på förvarens säkerhet	69
4.7.4	Grundvattenflöde, grundvattenkemi och transport av lösta ämnen	69
4.8	Planerade insatser för ytekosystem	70
4.9	Planerade insatser för klimat och klimatrelaterade processer	70
4.10	Äspölaboratoriets avslutande	71
4.10.1	Pågående långtidsförsök	71
4.10.2	Nya fältförsök	73
4.11	Övervakning under uppförande och drift	73
4.11.1	Övervakningsprogram	73
4.11.2	Internationell utveckling	74
4.12	Avveckling	75
4.13	Övriga områden	75
4.13.1	Bevarande av information och kunskap genom generationer	75
4.13.2	Andra metoder för slutförvaring	77
5	Arbetsätt, kompetens och resurser	79
5.1	Fud-programmets roll för öppenhet och insyn	79
5.2	Forskning	80
5.2.1	Styrning av forskning	80
5.2.2	Forskningens framtida inriktning	80
5.2.3	Granskning, öppenhet och insyn	81
5.3	Teknikutveckling	82
5.3.1	Bedömning av teknisk teknikmognad	82
5.3.2	Styrning av teknikutveckling	82
5.3.3	Teknikutvecklingsprocess	83
5.3.4	Gränssnitt mellan teknikutveckling och konstruktion	83
5.3.5	Kvalitetssäkring, styrning och kontroll	84
5.4	SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration	84
5.4.1	Äspölaboratoriet	84
5.4.2	Kapsellaboratoriet	87
5.5	IT-arbetsverktyg	87
5.5.1	Databaser	88
5.5.2	Modell- och beräkningsverktyg	88
5.5.3	Undersökningsmetoder och instrument för platsmodellering	89
5.5.4	Kvalitetssäkring	89
5.6	Kompetens och resurser	89
5.6.1	Uppbyggnad, utveckling och bevarande av kompetens	90
5.6.2	Utvecklingsområden inom kompetens	91

5.6.3	Kompetensnätverk och samarbeten	91
5.6.4	Närliggande utmaningar och upprätthållande av kompetens på längre sikt	94
6	Låg- och medelaktivt avfall	99
6.1	Sorptionspåverkan	99
6.2	Gasbildning	101
6.3	Svällning av jonbytarmassor	102
6.4	Radionuklidinventarium	102
6.4.1	Referensinventarium	103
6.4.2	Metodutveckling för svärmätbara nuklider	104
6.5	Acceptanskriterier för avfall i SFL och det utbyggda SFR	105
6.6	Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare	106
6.6.1	Avfallsbehållare	106
6.6.2	Avfallstransportbehållare	106
7	Använt kärnbränsle	107
7.1	Icke-reguljära bränslen och bränsleintegritet	107
7.2	Bränslekaraktärisering, resteffekt och strålning	109
7.3	Bränsleinformation och optimering av val av bränsle för inkapsling	111
7.4	Acceptanskriterier för bränsle	112
7.5	Kriticitet	113
7.6	Kärnämneskontroll	114
7.7	Bränsleupplösning	114
7.8	Radionuklidspeciering och lösligheter	117
8	Kapsel för använt kärnbränsle	119
8.1	Korrosion	119
8.1.1	Sulfidkorrosion	119
8.1.2	Korrosion under oxiderande förhållanden	121
8.1.3	Koppar i rent vatten	122
8.1.4	Strålningsinducerad korrosion	122
8.1.5	Spänningskorrosion	123
8.1.6	Utveckling av korrosionsmodeller och integrering av korrosionsanalyser	125
8.2	Materialegenskaper kapselmaterial	126
8.2.1	Kopparkrypning	127
8.2.2	Väteförspredning i koppar, segjärn och stål	128
8.2.3	Strålningseffekter på koppar, segjärn och stål	129
8.2.4	Åldring hos segjärn och stål	130
8.3	Konstruktion	131
8.4	Tillverkning, kontroll och provning	132
8.4.1	Tillverkning av koppardelar	132
8.4.2	Tillverkning av insats	133
8.4.3	Svetsning av kopparhöljet	134
8.4.4	Kontroll och provning	135
9	Cementbaserade material	137
9.1	Cementbaserade material – utveckling efter förslutning	137
9.1.1	Grundvattnets inverkan på cementbaserade material	137
9.1.2	Modellering av gastransport	138
9.1.3	Påverkan från nedbrytning av organiskt avfall	138
9.1.4	Påverkan från korrosion av metalliskt avfall	139
9.1.5	Bentonitens inverkan på cementbaserade material	139
9.1.6	Inverkan av förändrad bindemedelssammansättning och tillsatsmaterial	140
9.1.7	Långtidsutveckling av återfyllningsmaterial	140
9.2	Utformning av betongkonstruktioner och material till SFR	141
9.2.1	Bergssal för medelaktivt avfall, 2BMA	141
9.2.2	Utformning av system för gastransport	143

9.2.3	Betongtankars hållfasthetsegenskaper	143
9.2.4	Reparation och förstärkning av betongkonstruktionen i 1BMA	144
9.3	Utformning av betongkonstruktioner och material till Kärnbränsleförvaret	144
9.3.1	Plugg till deponeringstunnlar	144
9.3.2	Låg-pH-cementmaterial för injektering och bergförstärkning	145
10	Lerbarriärer, pluggar och förslutning	147
10.1	Bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till mättnad	148
10.1.1	Gasfasens sammansättning under den omättade perioden	148
10.1.2	Kanalbildning/erosion	149
10.1.3	Vattenupptag	150
10.1.4	Svällning, homogenisering av block, pellets och hålrum	152
10.1.5	Ångcirkulation	154
10.1.6	Mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden	155
10.2	Bentonitmaterialets egenskaper i mättat tillstånd	156
10.2.1	Materialsammansättning	156
10.2.2	Svälltryck och hydraulisk konduktivitet	156
10.2.3	Skjuvhållfasthet	157
10.3	Bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad	158
10.3.1	Gastransport	158
10.3.2	Sulfidbildning och sulfidtransport	158
10.3.3	Kolloidfrigörelse/erosion	159
10.3.4	Självläkning av bentonit	160
10.3.5	Mineralstabilitet	161
10.3.6	Radionuklidtransport	163
10.4	Utformning av barriärer	163
10.4.1	Buffert i Kärnbränsleförvaret	163
10.4.2	Återfyllning i Kärnbränsleförvaret	164
10.5	Tillverkning samt kontroll och provning av buffert- och återfyllningskomponenter	165
10.5.1	Kvalitetssäkring av bentonitmaterial	165
10.5.2	Tillverkning av buffertkomponenter	165
10.5.3	Tillverkning av återfyllningskomponenter	166
10.6	Deponering och installation av buffert och återfyllning	166
10.6.1	Generellt gällande maskinutveckling	166
10.6.2	Deponering	166
10.6.3	Installation av buffert	167
10.6.4	Installation av återfyllning	167
10.7	Borrhålsförslutning	167
10.8	Förslutning	168
10.8.1	Förslutning av Kärnbränsleförvaret	168
11	Berg	169
11.1	Karakterisering och modellering av bergets egenskaper och beteende	169
11.1.1	Bergets mekaniska egenskaper och beteenden	169
11.1.2	Inducerad rörelse i bergmassan orsakad av termisk, seismisk eller glacial belastning	171
11.1.3	Bergspänningar	172
11.2	Modellering av diskreta spricknätverk	174
11.3	Seismisk påverkan på förvarens säkerhet	176
11.3.1	Seismisk övervakning	176
11.3.2	Undersökningar av paleoseismicitet	178
11.3.3	Modellering av seismisk påverkan på Kärnbränsleförvaret	181
11.4	Grundvattenflöde, grundvattenkemi och transport av lösta ämnen	182
11.4.1	Utveckling av beräkningsverktyg för grundvattenflöde och transport av lösta ämnen	182
11.4.2	Processer som påverkar den hydrokemiska miljön	184
11.4.3	Transportegenskaper och processer som påverkar ämnestransport i berget	186
11.4.4	Klimatets inverkan på processer i geosfären	189

12	Ytekosystem	191
12.1	Upptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider hos olika organismer	191
12.2	Temporal och spatial heterogenitet i landskapet	194
12.3	Transport- och ackumulationsprocesser	196
12.4	Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos betydelsefulla ämnen	198
13	Klimat och klimatrelaterade processer	201
13.1	Klimatscenarier och utvärdering av extremer	201
13.2	Historiska klimatförändringar	202
13.3	Havsnivåvariationer och strandlinjeförskjutning på kort och lång sikt	203
13.4	Denudationsprocesser som påverkar bergytan, inklusive kvantifiering av historisk och framtida glacial erosion	206
13.5	Inlandsisars dynamik och beteende	209
13.6	Utvärdering permafrostmodell	210
13.7	Analogier för glacial hydrologi, hydrogeologi och geokemi under glaciala förhållanden	213
14	Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar	217
14.1	Begrepp och krav	217
14.2	Ansvar och arbetsfördelning	219
14.2.1	Arbetsfördelning mellan tillståndshavare och SKB	219
14.3	Nationell och internationell samordning	221
14.3.1	Industrigemensam samordning	221
14.3.2	Samordning Uniper	222
14.3.3	Samordning Vattenfall	222
14.4	Kompetens	222
15	Planering för avveckling inom Uniper	225
15.1	Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling	225
15.2	OKG Aktiebolags planering för avveckling	227
16	Planering för avveckling inom Vattenfall	231
16.1	Ringhals AB:s planering för avveckling	232
16.2	Forsmarks Kraftgrupp AB:s planering för avveckling	234
16.3	Vattenfalls planering för avveckling av Ågestareaktorn	236
17	Planering för avveckling av SKB:s anläggningar	239
17.1	Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle – Clink	239
17.2	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall – SFR	239
17.3	Slutförvaret för långlivat avfall – SFL	240
17.4	Kärnbränsleförvaret	240
18	Fortsatta aktiviteter inom avveckling	241
18.1	Industrigemensamt utvecklingsarbete	241
18.1.1	Icke-reguljära bränslen	241
18.1.2	Harmoniserad tillståndsprocess	241
18.1.3	Internationellt utvecklingsarbete	242
18.2	Utveckling inom Uniper	242
18.3	Utveckling inom Vattenfall	243
	Referenser	245
	Bilaga Förkortningar och förklaringar	273

Del I

Verksamhet och handlingsplan

- 1 Introduktion
- 2 Beskrivning av avfallssystemet
- 3 Plan för genomförande
- 4 Fortsatt forskning och utveckling
- 5 Arbetssätt, kompetens och resurser

I del I av Fud-program 2022, beskrivs verksamhet och handlingsplan för att ta hand om och slutförvara kärnavfall och använt kärnbränsle från driften och avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna. Ur ett strategiskt perspektiv förklaras varför aktiviteter görs eller planeras att göras och en bakgrund ges till i vilken ordning dessa genomförs. SKB:s verksamhet påverkas av yttre faktorer, vilket kräver att verksamheten, planeringen liksom organisationen är flexibel och att beslut kan fattas om att arbeta efter ändrade prioriteringar i planeringen av aktiviteter och milstolpar för kärnavfallsprogrammet. Reaktorinnehavarna behöver på samma sätt vara flexibla inför förändrade förutsättningar vilket kan resultera i nya planeringsförutsättningar för SKB.

Utifrån handlingsplanen motiveras och sammanfattas de planerade insatserna inom forskning och utveckling som behövs för att genomföra de återstående delarna av kärnavfallssystemet och för att avveckla kärnkraftsreaktorerna och SKB:s kärntekniska anläggningar. Där beskrivs också det arbetssätt som SKB har utvecklat för att genomföra den forskning och utveckling som behövs för att kunna realisera planen och ta hand om radioaktivt avfall och använt kärnbränsle på ett säkert och kostnadseffektivt sätt.

I del I ingår även en sammanfattande redovisning av kunskapsläget och planerade insatser inom området övervakning som är av intresse för SKB, utifrån det övervakningsprogram för Kärnbränsleförvaret som är under framtagande. Programmet syftar till att ge en samlad bild av SKB:s övervakningsaktiviteter under uppförande och drift av förvaret. Därutöver redogörs för SKB:s utgångspunkt och arbete med kunskaps- och informationsöverföring om slutförvaren, både under deras drifttid och efter förslutning.

1 Introduktion

Den svenska kraftindustrin har under nästan 60 år producerat elektricitet med kärnkraft. År 1964 togs Ågestareaktorn, landets första kommersiella kärnkraftsreaktor, i drift. Sedan dess har ett system byggts upp, för att på ett säkert sätt ta hand om det använda kärnbränslet och kärnavfallet från driften och rivningen av de svenska kärnkraftsreaktorerna. De anläggningar som är i drift är ett Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab), Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR), lokala markförvar och mellanlager samt ett fartyg och transportbehållare.

För att kunna ta hand om det använda kärnbränslet på ett långsiktigt säkert sätt återstår det att uppföra och driftsätta det system av anläggningar, KBS-3-systemet, som behövs för slutförvaring. Därefter följer driften av systemet och när allt använt kärnbränsle deponerats kan anläggningarna avvecklas och slutförvaret förslutas. I KBS-3-systemet ingår Clab med en anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet (tillsammans kallat Clink), behållare för transporter av kapslar med använt kärnbränsle och ett slutförvar för kapslar med använt kärnbränsle (Kärnbränsleförvaret). Förutom dessa anläggningar behövs ett system för produktion av kapslar samt ett för produktion av buffert- och återfyllningskomponenter.

För omhändertagande av det låg- och medelaktiva drift- och rivningsavfallet behöver kapaciteten i mellanlager utökas och SFR byggas ut. Dessutom behöver en plats lokaliseras för ytterligare ett slutförvar, Slutförvaret för långlivat avfall (SFL), förvaret byggas och behållare för transporter av långlivat avfall tillverkas och införskaffas.

Genomförandeplanen i detta Fud-program beskriver de övergripande planerna för att realisera de återstående delarna av avfallssystemet och anpassa befintliga anläggningar på ett sådant sätt att människor och miljön skyddas – idag och i framtiden. Ett antal kärnkraftsreaktorer befinner sig för närvarande under avveckling. Fud-programmet beskriver därför planeringen för de reaktorer som ska avvecklas på 2020-talet.

1.1 Förutsättningar

Viktiga förutsättningar för att på ett säkert sätt ta hand om det använda kärnbränslet och kärnavfallet från de svenska kärnkraftsreaktorerna utgörs av gällande regelverk, grundläggande principer för genomförandet samt politiska inriktningsbeslut, reaktorernas planerade driftstider samt principerna för indelning av kärnkraftens restprodukter i olika avfallskategorier.

1.1.1 Gällande regelverk och SKB:s uppdrag

Enligt 10 § i lagen om kärnteknisk verksamhet (KTL, SFS 1984:3) ska den som bedriver kärnteknisk verksamhet svara för de åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt avveckla och riva anläggningar samt hantera och slutförvara använt kärnbränsle och kärnavfall. I 11 § föreskrivs att den som har tillstånd att driva en kärnkraftsreaktor ska svara för den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för att fullgöra skyldigheterna i 10 §.

Tillståndshavare för kärnkraftsreaktorerna i Forsmark, Oskarshamn, Ringhals, Barsebäck och Ågesta är Forsmarks Kraftgrupp AB, OKG Aktiebolag, Ringhals AB, Barsebäck Kraft AB och Vattenfall AB. Dessa företag benämns fortsättningsvis reaktorinnehavarna.

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) ägs av reaktorinnehavarna och dess ägare, Vattenfall AB, OKG Aktiebolag, Forsmarks Kraftgrupp AB och Sydkraft Nuclear Power AB. På uppdrag av sina ägare svarar SKB för hantering och slutförvaring av kärnavfallet och det använda kärnbränslet från de svenska kärnkraftverken. För detta ändamål äger och driver SKB ett transportsystem och anläggningar för avfallshantering.

Reaktorinnehavaren har ansvar för att avveckla sina kärnkraftsreaktorer och SKB har fått i uppdrag att delta i planeringen av avvecklingen. SKB samverkar med de olika avvecklingsprojekten i centrala frågor som rör avfallshanteringen, exempelvis acceptanskriterier och typbeskrivningar för rivningsavfall samt transporter.

Enligt 12 § i KTL ska den som har tillstånd att inneha eller driva en kärnkraftsreaktor, i samråd med övriga reaktorinnehavare upprätta eller låta upprätta ett program för den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet och de övriga åtgärder som behövs för säker hantering av kärnavfall och använt kärnbränsle samt säker avveckling och rivning av kärntekniska anläggningar. Ett sådant program för forskning, utveckling och demonstration (Fud-program) ska lämnas till Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) vart tredje år. Det är SKB som på uppdrag av reaktorinnehavarna och i samarbete med dessa utarbetar Fud-programmen och lämnar dem till SSM.

Reaktorinnehavarna är, enligt lagen om finansiering av kärntekniska restprodukter (finansieringslagen, SFS 2006:647), skyldiga att fondera medel för kostnaderna för de framtida åtgärder som krävs för hanteringen och slutförvaringen av kärntekniska restprodukter, avvecklingen och rivningen av anläggningarna samt den forskning som krävs för att möjliggöra detta. Riksgälden har det övergripande ansvaret att säkerställa kärnkraftsindustrins betalningsansvar och att följa upp att finansieringssystemet fungerar som det ska. På uppdrag av reaktorinnehavarna upprättar SKB i enlighet med finansieringslagen en kostnadsberäkning vart tredje år, se avsnitt 1.3.

Förutom det kärnavfall som SKB tar emot från reaktorinnehavarna, tar SKB också emot radioaktivt avfall från sjukvård, forskning och industrier. Detta regleras genom avtal mellan SKB och de företag som producerat avfallet alternativt hanterar det för annat företags räkning, oberoende av vem som har det juridiska ansvaret för avfallet.

1.1.2 Grundläggande principer

Hanteringen av radioaktiva ämnen är reglerad i lagar och förordningar. Radioaktivt avfall är material som avger joniserande strålning som är skadlig och utgör avfall enligt 15 kap. 1 § i miljöbalken (MB, SFS 1998:808) eller som det inte finns någon planerad och godtagbar användning för. Kärnavfall är radioaktivt avfall som bildas i kärnkraftverk eller andra kärntekniska anläggningar. I praktiken betraktas och behandlas det använda kärnbränslet som avfall, även om det inte är juridiskt definierat som avfall innan det slutligt placerats i ett slutförvar.

Viktiga grundläggande principer som finns i lagstiftningen är:

- Den som har gett upphov till använt kärnbränsle och radioaktivt avfall ska också bära kostnaderna för omhändertagandet.
- Tillståndshavaren för en kärnteknisk verksamhet, liksom den som i övrigt utövar verksamhet med strålning, är skyldig att på ett säkert sätt hantera och slutförvara använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från verksamheten.
- Staten har ett sekundärt ansvar för det använda kärnbränslet och radioaktiva avfall som genererats i landet. Ansvaret innebär att om det inte finns någon som kan göras ansvarig för säkerheten ansvarar staten till dess att en tillståndshavare kan fullgöra skyldigheterna.
- Sverige tar ansvar för använt kärnbränsle och radioaktivt avfall som uppkommer i landet.
- Berörda kommuner har vetorätt mot etablering av nya kärntekniska anläggningar.

En annan central princip är det politiska beslutet att det använda kärnbränslet inte ska upparbetas.

SKB tillämpar geologisk slutförvaring av kortlivat radioaktivt avfall och har under långt tid planerat för att tillämpa det också för det använda kärnbränslet och långlivat radioaktivt avfall. Flertalet länder och organisationer som International Atomic Energy Agency (IAEA) och Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA) är idag överens om att geologisk deponering är en lösning som har förutsättningar att uppfylla kraven på säker slutförvaring och genomförbarhet. Vidare stöds geologisk deponering av EU:s gemenskapsramverk för ansvarsfull och säker hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall.¹

¹ Rådets direktiv 2011/70/Euratom av den 19 juli 2011 om inrättande av ett gemenskapsramverk för ansvarsfull och säker hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall.

Nedanstående principer ligger till grund för utformningen av SKB:s slutförvar:

- Förvaren ska förläggas till en långsiktigt stabil geologisk miljö.
- Förvaren ska förläggas i berggrund som kan antas vara ekonomiskt ointressant för kommande generationer.
- Förvarens säkerhet ska baseras på flera barriärer (flerbarriärprincipen).
- Tekniska barriärer ska i första hand bestå av naturligt förekommande material som är långsiktigt stabila i förvarsmiljön.
- Förvaren ska utformas på ett sådant sätt att säkerheten inte är beroende av aktiva åtgärder som underhåll och reparationer efter förslutning.

Flerbarriärprincipen är en grundläggande och internationellt vedertagen säkerhetsprincip för slutförvaring. Den innebär att ett slutförvars säkerhet efter förslutning ska baseras på flera barriärer som har till uppgift att innesluta, förhindra eller fördröja spridningen av de radioaktiva ämnena i avfallet. Vilka barriärer och övriga komponenter som behövs i ett slutförvar beror till stor del på mängden radioaktiva ämnen, deras halveringstider och avfallets övriga egenskaper. Det innebär att kraven på barriärerna och deras beständighet i SFR blir annorlunda än de för slutförvaren för använt kärnbränsle respektive långlivat radioaktivt avfall.

Ovanstående principer har tillsammans med flera andra överväganden, som till exempel att ett förvar rent tekniskt ska vara möjligt att konstruera, lett till att SKB har utvecklat och valt KBS-3-metoden² för slutförvaring av använt kärnbränsle. Sveriges regering har genom sitt beslut att ge SKB tillstånd att uppföra, inneha och driva Kärnbränsleförvaret bedömt att den ansökta verksamheten uppfyller kraven på val av metod och bästa möjliga teknik (BAT).

KBS-3-metoden, vars utveckling påbörjades under slutet av 1970-talet, bygger på ett system av passiva samverkande skyddsbarriärer som tillsammans ska innesluta bränslet och förhindra att radioaktiva ämnen sprids till människor och miljön i perspektivet 100 000 år. Metoden kan sammanfattas på följande sätt:

- Det använda kärnbränslet placeras i kopparkapslar med hög tålighet mot korrosion i förvarsmiljön. De cirka fem meter långa kapslarna har en lastbärande insats som förstärker stabiliteten.
- Kapslarna omges av en buffert av bentonitlera – ett naturligt förekommande mineral som sväller i vatten. Bufferten skyddar kapseln vid mindre bergrörelser och skärmar av den från grundvattentrörelser. Den begränsar mängden korroderande ämnen i grundvattnet som kan nå kapseln. Bufferten absorberar också radioaktiva ämnen som kan frigöras om kapslarna skulle skadas.
- Kapslarna med omgivande bentonitlera placeras på cirka 500 meters djup i urberg med långsiktigt stabila förhållanden.
- Om någon kapsel skulle skadas utgör kärnbränslet och de radioaktiva ämnenas kemiska egenskaper, till exempel deras svåröslighet i vatten, kraftiga begränsningar för transport av radioaktiva ämnen från förvaret till markytan.

Internationellt sett är KBS-3-metoden en av de metoder för slutförvaring av använt kärnbränsle där utvecklingen har kommit längst. SKB har ett brett internationellt samarbete och sedan många år ett nära samarbete med systerorganisationen Posiva i Finland (avsnitt 5.6.3). Liksom SKB har Posiva valt att utforma sitt slutförvar för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. Ett stort steg togs i Finland i slutet av 2021 när Posiva lämnade in en ansökan om tillstånd för drift av slutförvars- och inkasplingsanläggningen till myndigheterna. Metoden, eller varianter av den, övervägs också som slutförvarsmetod i bland annat Kanada, Sydkorea, Storbritannien, Taiwan och Tjeckien.

² KBS-3-metoden har fått sitt namn då den bygger på den tredje rapporten i projektet KärnbränsleSäkerhet (Kärnbränslecykelns slutsteg, Använt kärnbränsle (SKBF/KBS 1983)).

1.1.3 Reaktorernas planerade drifttider

Reaktorernas drifttider är en viktig faktor för planeringen av kärnavfallsprogrammet. Utifrån reaktorinnehavarnas aktuella planeringsförutsättningar, görs prognoser för de mängder kärnavfall och använt kärnbränsle som ska omhändertas i avfallssystemet samt när i tiden behov för mellanlagring och slutförvaring uppstår.

De två reaktorerna vid Barsebäcks kärnkraftverk stängdes 1999 respektive 2005, Oskarshamns kärnkraftverk stängde två av tre reaktorer efter beslut 2015 respektive 2017 och vid Ringhals kärnkraftverk stängdes två av fyra reaktorer 2019 respektive 2020. Samtliga nu stängda reaktorer togs i drift under 1970-talet. För de sex reaktorer som är i drift är den planerade drifttiden 60 år. Detta gäller reaktorerna Forsmark 1, Forsmark 2 och Forsmark 3, Oskarshamn 3 samt Ringhals 3 och Ringhals 4. De yngsta reaktorerna, Forsmark 3 och Oskarshamn 3, kommer därmed att vara i drift till 2045 enligt den planering som reaktorinnehavarna har idag.

Konsekvenser för avfallssystemet av förändrade drifttider diskuteras i avsnitt 3.7.1.

1.1.4 Det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet

Använt kärnbränsle, radioaktivt avfall men också konventionellt avfall genereras vid drift och avveckling av kärnkraftreaktorerna. Det använda kärnbränslet och det radioaktiva avfallet behöver hållas avskilt från människor och miljön, för att undvika skadlig påverkan från joniserande strålning.

Omhändertagandet av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet styrs till stor del av avfallens egenskaper. Avfallet delas in i kategorier efter aktivitetsinnehåll (mycket lågaktivt, lågaktivt, medelaktivt eller högaktivt) och efter de radioaktiva ämnenas halveringstid (kort- eller långlivade). Aktiviteten styr hur avfallet hanteras. Det medelaktiva avfallet och det högaktiva använda kärnbränslet kräver en strålskärmad hantering medan lågaktivt avfall kan hanteras utan strålskärmning. Hur slutförvaringen ska utformas styrs till stor del av om de radioaktiva ämnena i avfallet är kortlivade eller långlivade, då det har betydelse för den tid som barriärernas funktion behöver upprätthållas.

Hur stor mängd avfall som uppkommer och när avfallet uppkommer är också viktiga utgångspunkter för planeringen av avfallssystemet. Avfallsmängderna är beroende av reaktorernas drifttid, tillgänglighet och andra driftförhållanden. Avfallssystemet är utformat för att hantera och slutförvara kärnavfall och använt kärnbränsle från driften och avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna och baseras på respektive reaktorinnehavares prognoser. Vid avvecklingen av kärnkraftreaktorerna kommer stora volymer material att kunna friklassas.

Mycket lågaktivt avfall

Avfall som innehåller mindre mängd kortlivade radionuklider med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år³, begränsad mängd långlivade radionuklider och har en dosrat på kollen som är under 0,5 mSv/h klassificeras som mycket lågaktivt avfall. Detta avfall uppstår både under drift och rivning av kärnkraftverken. Under drift genereras det främst under revisioner samt underhålls- och serviceinsatser. Den andel av rivningsavfallet som klassificeras som mycket lågaktivt består huvudsakligen av nedmonterade system och strukturdelar samt skydds- och saneringsutrustning.

Hantering av mycket lågaktivt avfall bestäms av materialslag och aktivitetsinnehåll och sker huvudsakligen på plats vid kärnkraftverken. Det mycket lågaktiva avfallet sorteras i två fraktioner, kompakterbart respektive icke-kompakterbart avfall. För det mycket lågaktiva avfallet som uppkommer under drift är viktfordelningen cirka 45 procent metall, 40 procent mjukavfall och 15 procent inert avfall. Den största volymen utgörs dock av mjukavfall.

Slutförvaringen av mycket lågaktivt avfall sker idag huvudsakligen i markförvar. Alternativ mer komplex behandling, exempelvis förbränning och smältning, sker i särskilda anläggningar. Under ett normalt driftår produceras 50–100 ton mycket lågaktivt avfall per reaktor. Vid avveckling av en reaktor genereras uppskattningsvis 250–500 ton mycket lågaktivt avfall per år under en period av cirka tio år. Prognoserna för mycket lågaktivt rivningsavfall innehåller stora osäkerheter.

³ Kortlivad radionuklid definieras enligt IAEA Safety Standards, Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide, No GSG-1 som en radionuklid med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år.

Låg- och medelaktivt avfall

Det låg- och medelaktiva avfallet kan vara kort- eller långlivat. Kortlivat avfall innehåller till övervägande del radionuklider med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år och en begränsad mängd radionuklider med längre halveringstid. Avfall klassas som långlivat om det har ett signifikant innehåll av långlivade radionuklider. Detta är helt oberoende av mängden kortlivade radionuklider som avfallet innehåller.

Låg- och medelaktivt avfall uppkommer både under drift och rivning av kärntekniska anläggningar. Driftavfallet består till exempel av förbrukade filter, utbytta komponenter och använda skyddskläder. Rivningsavfallet består bland annat av metallskrot och byggnadsmaterial.

Huvuddelen av det kortlivade avfallet kommer från kärnkraftverken. Övrigt kortlivat avfall kommer idag från Clab och senare från Clink⁴ samt från sjukvård, forskning och industrier. Kortlivat avfall deponeras i SFR. Enligt nuvarande prognoser kommer cirka 180 000 kubikmeter avfall att slutförvaras i SFR.

Det långlivade avfallet från kärnkraftverken består av förbrukade hårdkomponenter, reaktortankar från tryckvattenreaktorer (PWR) och styrstavar från kokvattenreaktorer (BWR). De långlivade radionukliderna bildas av stabila grundämnen i till exempel stål, när dessa utsätts för stark neutronbestrålning från reaktorhärden. Mängden långlivat låg- och medelaktivt avfall från kärnkraftverken uppskattas till cirka 6 000 kubikmeter.

Dessutom finns långlivat avfall både från forskning och utveckling inom de svenska kärnforskningsprogrammen samt från sjukvård, forskning och industrier. Mängden långlivat låg- och medelaktivt avfall från dessa uppskattas till cirka 11 000 kubikmeter och hanteras av AB SVAFO.

Använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet utgör en mindre del av den totala volymen avfall som ska slutförvaras. Bränslet innehåller dock den helt dominerande mängden av all aktivitet, både kort- och långlivad. Använt kärnbränsle är högaktivt och kräver strålskärmning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Slutförvaringen kommer att ske i Kärnbränsleförvaret.

Det använda kärnbränslet alstrar värme även efter att det tagits ur reaktorn (resteffekt), vilket gör att det måste kylas för att inte överhettas. Resteffektens storlek beror framför allt på utbränningsgraden (hur mycket energi som utvunnits ur kärnbränslet) och hur lång tid som gått sedan det togs ut ur reaktorn. I och med den tekniska utvecklingen och förändringar i driften av reaktorerna för att få ett så effektivt utnyttjande av bränslet som möjligt, har utbränningen av bränslet successivt ökat sedan reaktorerna togs i drift. En konsekvens av ökad utbränning är ökad resteffekt, vilket är av betydelse vid mellanlagring och slutförvaring.

Nästan allt använt kärnbränsle som ska deponeras i Kärnbränsleförvaret kommer från de svenska kärnkraftverken. Men det finns även små mängder använt kärnbränsle som kommer från avslutade upparbetsavtal, andra typer av reaktorer samt Studsvik:s bränsleverksamhet. Den totala mängden använt kärnbränsle som ska slutförvaras förväntas inte överstiga 12 000 ton, uttryckt som den mängd uran som ursprungligen fanns i bränslet.

1.1.5 Tillståndsprövning för kärntekniska anläggningar

Det är regeringen som beslutar om tillstånd respektive tillåtlighet enligt KTL respektive MB för uppförandet av en kärnteknisk anläggning och genomförandet av större ombyggnader eller större ändringar av en befintlig anläggning. SSM är beredande myndighet för ansökningar enligt KTL och mark- och miljödomstolen (MMD) för ansökningar enligt MB och sökanden lämnar in ansökningar parallellt till båda instanserna. I ansökningarna ingår en förberedande preliminär säkerhetsredovisning (F-PSAR) eller motsvarande sammanfattande information och en miljökonsekvensbeskrivning (MKB).

⁴ En anläggningsdel kommer att uppföras i anslutning till Clab för inkapsling av det använda kärnbränslet. Den kommer efter färdigställande att drivas integrerat som en anläggning, Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle (Clink).

Syftet med ansökningarna är att visa att sökanden, i detta fall SKB, har kunskap och förmåga att konstruera anläggningen så att den uppfyller myndigheternas och andra ställda krav. Även efter att tillstånd enligt KTL erhållits, kommer forskning och teknikutveckling fortsätta, redovisas och bedömas i den fortsatta stegvisa prövningen. SKB har som del av ansökningarna om tillstånd att uppföra Kärnbränsleförvaret och inkapslingsanläggningen samt för utbyggnaden av SFR redovisat kunskapsläget och status för teknikutvecklingen. I ansökningarna ingår även utvärdering av betydelsen av osäkerheter för säkerheten efter förslutning av förvaren, SR-Site (SKB TR-11-01) för Kärnbränsleförvaret och SR-PSU (SKB TR-14-01) för SFR.

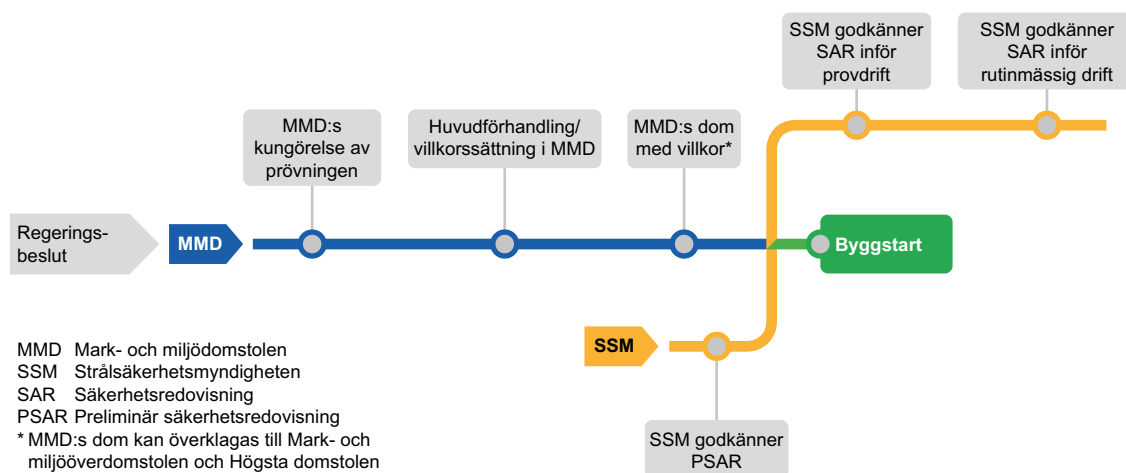
I ansökningshandlingarna redovisar SKB en referensutformning av tillkommande anläggningar med konceptuell beskrivning av hur relevanta krav kan uppfyllas. Fortsatt forskning, teknikutveckling och projekteringsarbete leder fram till utvecklade tekniska lösningar eller utformningar som är bättre eller effektivare.

När regeringen beslutat om tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB ska MMD utfärda miljö-tillstånd och föreskriva villkor enligt MB och SSM ska göra en fortsatt stegvis prövning, se figur 1-1.

I den stegvisa prövningen behövs godkännanden från SSM av flera säkerhetsredovisningar. Detta styrs av SSM:s föreskrifter som, baserat på internationella rekommendationer från bland annat IAEA och OECD/NEA, anger att utveckling och tillståndsgivning av kärntekniska anläggningar ska ske genom en process där kraven på anläggningen, dess utformning och tekniska lösningar successivt fastställs. Denna stegvisa process, som är gemensam för samtliga anläggningar, innefattar:

- **Godkännande av säkerhetsredovisning inför uppförande** – baserad på redovisning av en preliminär säkerhetsredovisning (PSAR) som redogör för anläggningens planerade utformning, hur verksamheten anordnas och hur kraven uppfylls.
- **Godkännande av säkerhetsredovisningen inför provdrift respektive rutinmässig drift** – baserad på successiva redovisningar av förnyad respektive kompletterad säkerhetsredovisning (SAR). Säkerhetsredovisningen ska sammantaget visa hur anläggningens säkerhet är anordnad och ska avspegla anläggningen som den är byggd, analyserad och verifierad samt visa hur gällande krav på dess konstruktion, funktion, organisation och verksamhet är uppfyllda.

Därutöver tillkommer notifiering till EU-kommissionen enligt Euratomfördraget artikel 41 från SKB inför uppförandet och enligt Euratomfördraget artikel 37 från svenska staten via SSM, baserat på underlag från SKB inför driftsättning. Krav på kärnämneskontroll från såväl svenska myndigheter som internationella kontrollorgan ska alltid uppfyllas för anläggningar där kärnämne kommer att hanteras. Detta innebär att SKB för dessa anläggningar inför uppförande, till SSM och EU-kommissionen lämnar in en preliminär grundläggande teknisk beskrivning, Basic Technical Characteristics (BTC) och en anläggningsbeskrivning för att sedan inför driftsättning, till SSM och EU-kommissionen ska överlämna en officiell fastställd BTC och en uppdaterad anläggningsbeskrivning.



Figur 1-1. Efter att regeringen beslutat om tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB följer villkorsprocess och dom av MMD samt stegvis prövning av SSM.

Driftperioden för ett slutförvar inleds med provdrift som innebär att använt kärnbränsle eller radioaktivt avfall deponeras. Efter provdriften övergår verksamheten i en förvaltningsfas under så kallad rutinmässig drift. Den som har tillstånd att inneha eller driva en kärntechnisk anläggning ska minst vart tionde år göra en systematisk helhetsbedömning av säkerhet och strålskydd. I samband med dessa görs också en genomgång och sammanställning av läget inom de kunskapsområden som är väsentliga för strålsäkerheten.

Det är regeringen som, enligt KTL, beslutar om den slutliga förslutningen av ett slutförvar. Det innebär att den omarbetade säkerhetsanalysen, som ska godkännas av SSM utgör underlag för regeringens prövning inför förslutning. Regeringen kan då även besluta om villkor som ska vara uppfyllda för att förvaret slutligt ska få förslutas. Staten ansvarar för ett slutligt förslutet geologiskt slutförvar och det avfall som finns i anläggningen.

1.2 Program för forskning, utveckling och demonstration

Fud-programmens fokus har varierat genom åren, beroende på var tyngdpunkten i SKB:s respektive reaktorinnehavarnas verksamhet har legat. I Fud-program 2010 (SKB 2010) fanns en kort sammanfattning av de program som SKB har presenterat fram till och med 2007. Därefter har en sammanfattning gjorts av det närmast föregående Fud-programmet.

1.2.1 Fud-program 2019

Fud-program 2019 (SKB 2019) var i mångt och mycket en vidareutveckling och uppdatering av programmet som lämnades 2016 (SKB 2016). SSM:s sammanfattande bedömning av Fud-program 2019 var att villkoren i regeringens beslut över Fud-program 2016 hörsammats och att redovisningen var ändamålsenlig i förhållande till lagstiftarens syfte med programmet och de krav som ställs på reaktorinnehavarna.

Redovisningen i Fud-program 2019 gav enligt SSM en tillräcklig överblick av reaktorinnehavarnas och SKB:s program och tillräcklig insikt i planerade insatser under Fud-perioden. Regeringen beslutade i december 2020 att Fud-program 2019 uppfyllde kraven i KTL och ställde som villkor för den fortsatta forsknings- och utvecklingsverksamheten att kommande Fud-program översiktligt ska redovisa planerade verksamheter, motsvarande den genomförandeplan för verksamheter som SKB ansvarar för. Redovisningen ska omfatta en principiell beskrivning av hanteringen av olika avfallsströmmar samt erforderlig och tillgänglig kapacitet för systemets olika delar i relation till den mängd eller volym använt kärnbränsle eller radioaktivt avfall som avses att hanteras och omhändertas. Fud-programmet ska fortsättningsvis omfatta samtliga avfallskategorier som förväntas omhändertas i respektive anläggning. Vidare angavs att, reaktorinnehavarna och SKB ska beakta hur Fud-programmet bättre kan bidra till öppenhet och insyn i hur arbetet med forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall bedrivs. Kommande Fud-program ska också omfatta en redovisning avseende informationsbevarande i enlighet med SSM:s och Kärnavfallsrådets rekommendationer.

1.2.2 Milstolpar och utveckling sedan Fud-program 2019

Systemet för låg- och medelaktivt avfall

När Fud-program 2019 redovisades pågick ett tillståndsärende i MMD och hos SSM avseende utbyggnaden av SFR för drift- och rivningsavfall som SKB ansökte om 2014. Huvudförhandlingen i MMD genomfördes hösten 2019. I november 2019 lämnade domstolen och SSM sina respektive yttranden till regeringen. I april 2021 tillstyrkte kommunfullmäktige i Östhammars kommun en utbyggnad av SFR. Regeringen beslutade om tillåtlighet enligt MB och tillstånd enligt KTL för utbyggnaden av SFR i december 2021. För SFR-utbyggnaden innebar regeringens beslut att processen går vidare med villkorsförhandling hos MMD i slutet av 2022 och inlämnande av ansökan inför uppförande till SSM därefter. Först efter dom från MMD samt godkännande av PSAR kan utbyggnaden av SFR påbörjas.

Parallellt med tillståndsprocessen har fortsatt forskning, utveckling och övrigt som behövs som underlag till bland annat PSAR för utbyggt SFR pågått.

SKB presenterade i september 2019 en värdering av säkerheten efter förslutning för ett föreslaget slutförvarskoncept för SFL (SKB TR-19-01), vilken även sammanfattades i Fud-program 2019. Utvärderingen visar att förvarskonceptet för SFL har möjlighet att uppfylla myndighetsföreskrifterna under lämpliga förhållanden, givet att ytterligare insatser måste göras i en kommande fullständig säkerhetsanalys för att underbygga detta. SSM har som en del av myndighetens granskning av framdriften i SKB:s Fud-program granskat säkerhetsvärderingen. SSM anser att det är ändamålsenligt att SKB baserar arbetet med att utveckla konceptet för SFL på erfarenheter från motsvarande processer som använts för utveckling och lokalisering av plats för de övriga förvararna och är positiva till den återkoppling på avfallets karakterisering som säkerhetsvärderingen ger.

KBS-3-systemet för använt kärnbränsle

När Fud-program 2019 redovisades hade SKB 2011 ansökt hos MMD och SSM om att uppföra och driva ett slutförvarssystem för använt kärnbränsle (KBS-3-systemet). SKB hade också 2015 ansökt om att få öka mängden använt kärnbränsle som kan mellanlagras i Clab från 8 000 till 11 000 ton.

Efter huvudförhandlingen i MMD för KBS-3-systemet 2017 hade både domstolen och SSM lämnat sina respektive yttranden till regeringen. SSM tillstyrkte SKB:s ansökan enligt KTL. Domstolen var positiv på flera viktiga punkter, men efterlyste mer underlag om bland annat kopparkapslarnas integritet. SKB lämnade det efterfrågade underlaget till Miljödepartementet i april 2019. Dessutom hade kommunfullmäktige i Oskarshamns kommun i juni 2018, beslutat att tillåta etablering av en inkapslingsanläggning för använt kärnbränsle invid mellanlagret i Simpevarp.

Sedan Fud-program 2019 lämnades in har kommunfullmäktige i Östhammars kommun, i oktober 2020, beslutat att tillåta en etablering av ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark. Regeringen bröt ut ansökan om att utöka mängden kärnbränsle för mellanlagring i Clab från den inlämnade ansökan, som avser ett system för hantering och slutförvaring av använt kärnbränsle. I augusti 2021 fick SKB tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB att öka mängden använt kärnbränsle i Clab. Under våren 2022 har villkorsförhandling hållits i MMD, dom och miljötillstånd meddelats för att öka mängden använt kärnbränsle i Clab från 8 000 till 11 000 ton. Först efter godkännande av SAR kan mängden bränsle i Clab utökas.

Regeringen beslutade om tillåtlighet enligt MB och tillstånd enligt KTL för resterande delar av SKB:s ansökan om KBS-3-systemet i januari 2022. Prövningsprocessen, med förhandling om villkor och inlämnande av ansökan inför uppförande (inklusive PSAR) förväntas fortsätta under 2023–2024, se figur 1-1. Först efter dom från MMD samt SSM:s godkännande av PSAR för Kärnbränsleförvaret respektive Clink kan uppförandet av slutförvarssystemet påbörjas.

Parallellt med tillståndsprocessen har fortsatt forskning, utveckling och övrigt arbete som behövs som underlag för bland annat PSAR för Kärnbränsleförvaret respektive Clink pågått.

Tydliggörande av statens ansvar för radioaktivt avfall

I en lagändring som trädde i kraft den 1 november 2020, tydliggjordes statens ansvar för ett slutligt förslutet geologiskt slutförvar och det avfall som finns i anläggningen. Då infördes också ytterligare ett steg i tillståndsprocessen, vilket innebär att tillstånd från regeringen krävs inför slutlig förslutning av ett geologiskt slutförvar (avsnitt 1.1.5).

1.2.3 Fud-program 2022

Fud-program 2022 har samma struktur med tre delar och motsvarande kapitel som Fud-program 2019, förutom att kapitlet om lokalisering och säkerhetsbedömning för SFL inte upprepas. Programmets delar är:

- Del I Verksamhet och handlingsplan.
- Del II Avfall och slutförvaring.
- Del III Utveckling av kärntekniska anläggningar.

Redovisningen i Fud-program 2022 syftar till att svara upp mot kravet på den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet som behövs för att utveckla och implementera återstående verksamheter

som anges i 12 § i KTL (avsnitt 1.1.1). Det innebär att programmet redovisar planerna för att genomföra de återstående delarna av avfallssystemet och för att avveckla kärnkraftsreaktorerna och SKB:s kärntekniska anläggningar. Det redovisar konkreta insatser inom forskning, teknikutveckling och demonstration som planeras för återstående verksamhet under kommande sex år, liksom planerade insatser för övriga områden som är av intresse för SKB. Verksamheter som bedrivs inom ramen för ett givet tillstånd redovisas ur ett övergripande systemperspektiv.

I detta Fud-program har den strategiska inriktningen tagits ett steg längre i förhållande till föregående Fud-program. Syftet är att ge motiv till de planer och aktiviteter som planeras. För kärnavfallsprogrammet är det av betydelse att det finns flexibilitet och att aktiviteter görs i en logisk följd där hänsyn tas till behov och beroenden. För att kärnkraftsreaktorerna ska kunna vara i drift behöver det finnas tillgängligt utrymme för att mellanlagra det använda kärnbränslet. För anläggningar som nedmonteras och rivs behöver det finnas mellanlager för avfallet innan nödvändiga slutförvar har uppförts. Dessa och andra beroenden avspeglas i aktivitets- och milstolpeplanen, vars fokus är att ge ett systemövergripande perspektiv där relationer mellan olika aktiviteter och milstolpar för de olika anläggningarna är viktigare än exakta tidpunkter.

Forskning och teknikutveckling har varit och är grunden för att kunna bygga säkra och ändamålsenliga slutförvar. Den stegvisa prövningen innebär dock att SKB:s forskning och teknikutveckling kopplad till en tillståndsgiven anläggning kommer att redovisas mer detaljrikt i det sammanhanget än i Fud-programmen. I detta Fud-program är programaktiviteterna i del II angivna i punktform för att ge en tydlig och övergripande sammanställning av de forsknings- och teknikutvecklingsinsatser som planeras att pågå under Fud-perioden.

Fud-program 2022 riktar sig främst till sakkunniga och beslutsfattare på myndigheter, men även till andra intressenter som är kunniga i kärnavfallsfrågor. Experters behov av information i specifika frågor tillmötesgås i referenser.

1.3 Finansiering

Kostnaderna för att ta hand om kortlivat låg- och medelaktivt avfall från driften av kärnkraftsreaktorerna betalas löpande av reaktorinnehavarna. Finansieringen av avvecklingen av reaktorerna och kärnavfallsprogrammet bygger på att reaktorinnehavarna betalar en kärnavfallsavgift per kilowattimme producerad el för de reaktorer som är i drift och som ett årligt belopp för de reaktorer som är permanent avställda. Dessa betalningar regleras i finansieringslagen och tillhörande förordning och placeras i en särskild fond, kärnavfallsfonden.

Förutom att betala avgifter, ställer reaktorinnehavarnas moderbolag säkerheter för att täcka de avgifter som ännu inte är betalda (finansieringsbeloppet). Dessutom ställs även en säkerhet för det fall att fonden inte skulle komma att räcka på grund av oplanerade händelser (kompletteringsbeloppet). Finansierings- och kompletteringsbeloppet, tillsammans med reaktorinnehavarens andel i kärnavfallsfonden, ska säkerställa att reaktorinnehavaren kan fullgöra sina skyldigheter, även om inga ytterligare kärnavfallsavgifter betalas och inga ytterligare säkerheter ställs.

Vart tredje år upprättar SKB en kostnadsberäkning, planrapport, på uppdrag av reaktorinnehavarna. Redovisningen lämnas in till Riksgälden som granskar SKB:s beräkning, beräkningsmetoder och underlag. Riksgälden lämnar förslag till regeringen på kärnavfallsavgifter, finansierings- och kompletteringsbelopp för kommande treårsperiod. Avgifterna och beloppens storlek beslutas av regeringen. Reaktorinnehavarna betalar in medlen till Kärnavfallsfonden, en statlig myndighet som sorterar under Miljödepartementet. Enligt regeringens föreskrifter får dessa medel placeras på räntebärande konto i Riksgälden, i skuldförbindelser utfärdade av staten och säkerställda bostadsobligationer. En del av fonden kan även placeras i företagsobligationer och aktier.

Vid årsskiftet 2021/2022 fanns cirka 81 miljarder kronor i reaktorinnehavarnas andelar av kärnavfallsfonden (marknadsvärdet). Totalt uppgår båda säkerheterna till cirka 58 miljarder kronor. Därutöver har cirka 55 miljarder kronor (i dagens prisnivå) använts för bland annat lokaliseringsarbete, platsundersökningar, uppbyggnad och drift av dagens system och för forsknings- och utvecklingsarbete. Under åren 2021 till 2023 är den genomsnittliga kärnavfallsavgiften cirka 4,2 öre per producerad kilowattimme el för de kärnkraftverk som är i drift. Barsebäck Kraft AB betalar ingen avgift under samma period, eftersom värdet i fonden är tillräckligt för att täcka återstående kostnader.

2 Beskrivning av avfallssystemet

Avfallssystemet för omhändertagande av radioaktivt avfall består av två huvuddelar, systemet för låg- och medelaktivt avfall och systemet för det använda kärnbränslet (KBS-3-systemet). Transport-systemet är gemensamt för det låg- och medelaktiva avfallet och KBS-3-systemet. I figur 2-1 redovisas nuvarande och tillkommande anläggningar inom systemen med alternativa hanteringsvägar.

I detta kapitel redovisas nuvarande situation för systemen och utformning av de färdigställda systemen. Omhändertagandet av det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet beskrivs översiktligt och i kapitel 3 redovisas planerna för genomförande av systemens färdigställande.

Systemet för låg- och medelaktivt avfall omfattar anläggningar för hantering, mellanlagring och slutförvaring. För närvarande finns SFR liksom anläggningar för behandling, mellanlagring och slutförvaring i markförvar i anslutning till de kärntekniska anläggningarna. För att slutligt omhänderta allt radioaktivt avfall som uppkommer vid drift och avveckling av kärnkraftreaktorerna och andra kärntekniska anläggningar kommer befintliga anläggningar att byggas ut och nya anläggningar att tillkomma.

KBS-3-systemet omfattar anläggningar för omhändertagande av det använda kärnbränslet. För närvarande finns mellanlagret Clab. Anläggningar som tillkommer inom systemet är Clink, som utgörs av nuvarande Clab med en tillkommande anläggningsdel för inkapsling av det använda kärnbränslet, och Kärnbränsleförvaret för slutförvaring av det använda kärnbränslet.

Transportsystemet omfattar hamnar, ett fartyg, transportbehållare och terminalfordon för kortare landtransporter. Det kommer att kompletteras för de transporter som blir aktuella för de tillkommande anläggningarna.

De tre systemen är, när de färdigställts, utformade för omhändertagande av allt använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från reaktorinnehavarna och SKB:s kärntekniska anläggningar. Vid förändrade förutsättningar, av till exempel kärnkraftsreaktorernas drifttider eller prognos avseende aktivitetsinventarier, kommer detta att hanteras i enlighet med redovisning i avsnitt 3.7.

2.1 Anläggningar inom systemet för låg- och medelaktivt avfall

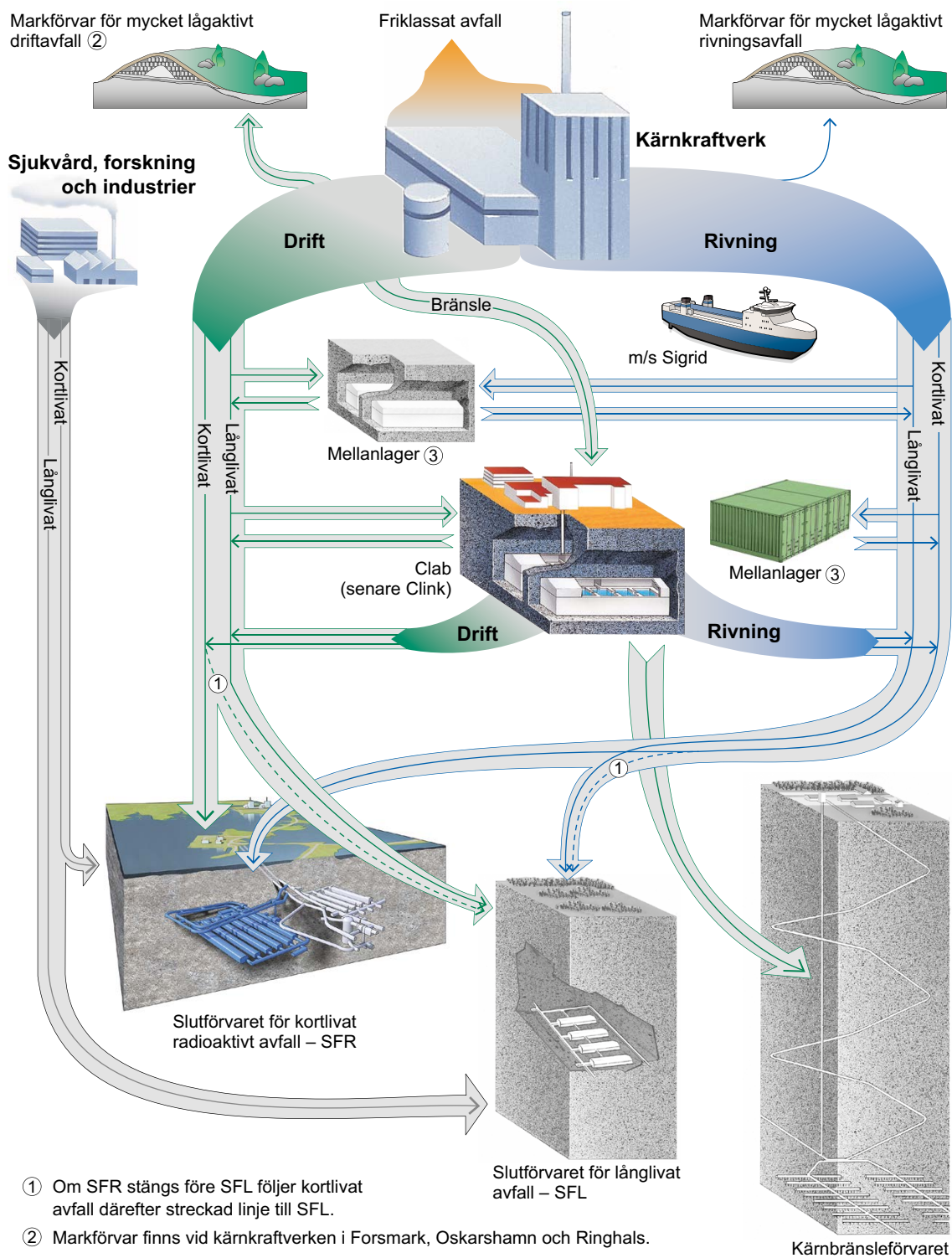
Systemet för låg- och medelaktivt avfall består av anläggningar för hantering, mellanlagring och slutförvaring. Anläggningarna och hantering av avfallet anpassas till olika kategorier av avfallet, se avsnitt 1.1.4. Inom systemet finns anläggningar som drivs av SKB och anläggningar som drivs av reaktorinnehavare. Därutöver finns anläggningar i Studsvik, vid vilka avfall från kärnkraftverken och Clab vid behov hanteras eller mellanlagras. De nuvarande anläggningarna kommer att byggas ut och kompletteras med nya för att omhänderta och slutförvara allt det radioaktiva avfall som uppkommer vid drift och avveckling av de svenska kärnkraftreaktorerna och SKB:s kärntekniska anläggningar.

2.1.1 Anläggningar för kortlivat avfall

Var kortlivat avfall slutförvaras är beroende på innehållet av radioaktivitet. Avfall som innehåller radionuklider med kort halveringstid och har låg ytdosrat kan slutförvaras i markförvar. Övrigt kortlivat avfall placeras i SFR.

Behandling av avfall

Vid kärnkraftverken, i Studsvik och i Clab finns behandlingsanläggningar för kortlivat avfall. Här behandlas avfallet så att det uppfyller de krav som ställs för friklassning eller för deponering i SFR alternativt i markförvar. Syftet med behandlingen kan vara att reducera volymen, koncentrera aktiviteten, solidifiera eller konditionera materialet. Vidare placeras det i avfallskolli som uppfyller krav för respektive avfallstyp och mottagande slutförvar. Vid avveckling av kärnkraftreaktorer uppkommer stora mängder avfall under relativt kort tid. Vid behov ökas därför kapaciteten för hantering av avfall i samband med avveckling, se kapitel 15 och 16.



Figur 2-1. Systemet för att ta hand om det radioaktiva avfall och använda kärnbränsle som uppkommer i Sverige. Heldragna linjer representerar transportflöden till befintliga eller planerade anläggningar. Streckade linjer representerar alternativa hanteringsvägar.

Mellanlager

Vid kärnkraftverken finns anläggningar för mellanlagring av kortlivat avfall. Det finns buffertlager för driftavfall inför vidare hantering såsom behandling och förpackning och buffertlager för färdiga avfallskollin inför transport för deponering i SFR.

Nedmontering och avveckling av sju reaktorer, inklusive Ågesta, inleddes innan utbyggnaden av SFR genomförts. Detta innebär att kapaciteten för mellanlagring av kortlivat avfall utökas för att ha plats för avfallet från avveckling vid kärnkraftverken Barsebäck, Oskarshamn, Ringhals och Ågesta. Vid Barsebäck har ett nytt mellanlager för lågaktivt avfall byggts. På Simpevarp har det befintliga mellanlagret, en lagringsbyggnad för lågaktivt avfall (LLA), utökats. Mellanlagring på Ringhals sker i ombyggda befintliga lager för medelaktivt avfall samt i ett nytt lager för lågaktivt avfall, som kommer att uppföras.

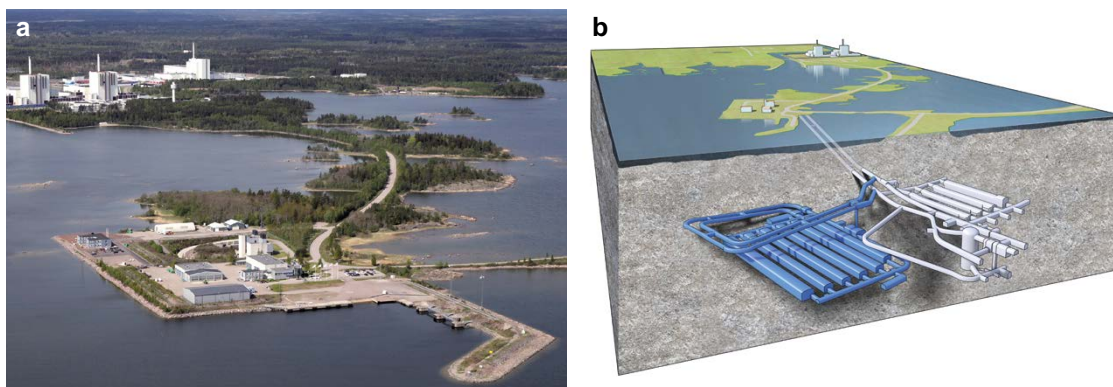
Markförvar

Delar av det lågaktiva avfallet innehåller mycket låg aktivitet. Avfall med en ytdosrat under 0,5 mSv/h och som till övervägande del innehåller kortlivade radionuklider, med en halveringstid som är kortare än cirka 30 år, får deponeras i markförvar. Detta avfall deponeras i de befintliga markförvar som är licensierade för driftavfall. Markförvaren finns på industriområdena vid kärnkraftverken i Forsmark, Oskarshamn och Ringhals. Enligt nuvarande praxis krävs att området står under institutionell kontroll i cirka 30 år efter att det sista avfallet deponerats. Markförvaren som idag finns på kraftverksområdena är endast licensierade för driftavfall. Det befintliga markförvaret i anslutning till Oskarshamns kärnkraftverk kommer att utökas för att ha kapacitet och tillstånd för deponering av avfallet från avveckling av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2 och även för återstående driftavfall från Oskarshamn 3. Utökningen planeras för att också kunna ta emot avfall från avveckling av Barsebäck. Även vid Forsmark och Ringhals planeras för utökning av kapacitet för markförvaring.

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall – SFR

SFR, som är lokaliserat till Forsmark, har varit i drift sedan 1988. SFR består av en ovanmarksdel och en undermarksdel med två tillfartstunnlar som anslutning mellan delarna, se figur 2-2. Slutförvaringen av det radioaktiva avfallet sker i bergssalar i undermarksdelen, som är placerad i berget 60–140 meter under havsbotten. Säkerheten efter förslutning för SFR baseras på att mängden långlivade radionuklider begränsas i förvaret och att de tekniska och naturliga barriärerna fördröjer spridningen av radionuklider. Utformningen av varje bergssal är anpassad utifrån aktivitetsnivån på det avfall som deponeras där.

Anläggningen har tillstånd att ta emot och slutförvara 63 000 kubikmeter kortlivat avfall. Vid årsskiftet 2021/2022 hade cirka 40 500 kubikmeter avfall deponerats i SFR. För att ge utrymme att slutförvara återstående avfall från drift och avveckling av de svenska kärnkraftverken kommer SFR att byggas ut. Utbyggnaden av undermarksdelen kommer att placeras 120–150 meter under havets botten, se figur 2-2.



Figur 2-2. Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR. a) Vy över ovanmarksdelen b) nuläge och planerad utbyggnad av undermarksdelen. Befintligt SFR är markerat med grått och den utbyggda delen med blått.

Efter utbyggnad utökas kapaciteten för slutförvaring med cirka 117 000 kubikmeter. Det kommer att totalt finnas två bergssalar för medelaktivt avfall, en i den befintliga delen (1BMA) och en i den utbyggda delen (2BMA). För lågaktivt avfall kommer det att totalt finnas fem bergssalar, en i den befintliga delen (1BLA) och fyra i den utbyggda delen (2–5 BLA). I den befintliga delen finns två bergssalar för betongtankar (1–2 BTF) och en silo för det mest aktiva avfallet. I den utbyggda delen kommer det att finnas en bergssal för reaktortankar från BWR (1BRT). Bergssalarnas placering i det utbyggda SFR framgår av figur 2-3.

2.1.2 Anläggningar för långlivat avfall

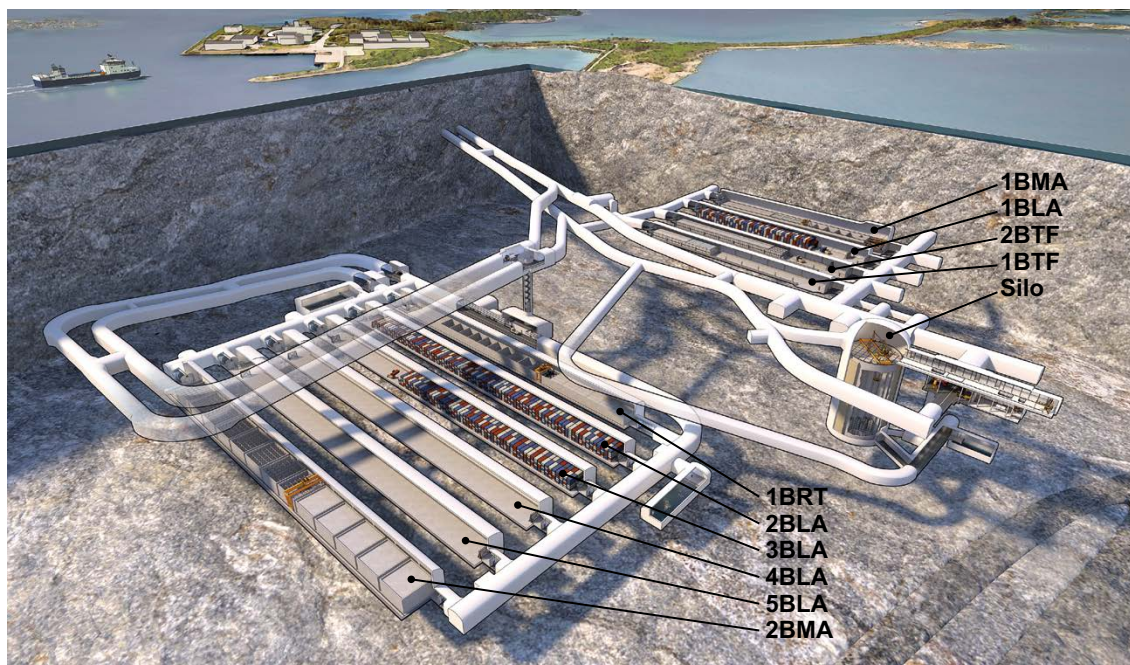
Behandling av avfall

Vid kärnkraftverken finns idag möjlighet att segmentera vissa förbrukade hårdkomponenter för att därefter placera dessa i ståltankar för lokal mellanlagring. Detta har tidigare genomförts i samband med uppgraderingar av reaktorerna, men genomförs för närvarande främst som en del av avvecklingsprojekten.

AB SVAFO utreder för närvarande förutsättningarna för att hantera så kallat historiskt avfall, som härrör från forskning och utveckling inom de svenska kärnforskningsprogrammen. Utredningen ska analysera hur de olika avfallsfraktionerna ska hanteras och vilka möjligheter som finns för hantering och slutförvaring.

Mellanlager

Det långlivade avfallet mellanlagras fram till att SFL har tagits i drift. För närvarande mellanlagras långlivat avfall i anslutning till kärnkraftverken, i Clab och i Studsvik. Clab är främst avsett för mellanlagring av använt kärnbränsle, men i bassängerna mellanlagras även långlivat driftavfall (styrstavar från BWR och andra hårdkomponenter). Det långlivade avfall som uppkommer från avveckling av reaktorer mellanlagras vid kärnkraftverket där avfallet uppkommer eller på annan plats.



Figur 2-3. Bergssalar i SFR när anläggningen är utbyggd.

Forsmarks Kraftgrupp AB har ett mellanlager i en byggnad på kärnkraftverksområdet, för både kort- och långlivat avfall som uppkommit i samband med revisioner och effekthöjningar. OKG Aktiebolag har ett mellanlager för låg- och medelaktivt avfall i ett särskilt bergrum på Simpevarpshalvön (BFA). Drifttillståndet innehas av OKG Aktiebolag, men BFA är godkänt för mellanlagring av härdkomponenter från alla svenska kärnkraftverk. För närvarande lagras avfall från Oskarshamn kärnkraftverk och Clab i BFA, som bedöms ha tillräcklig kapacitet även för det långlivade avfall som uppkommer vid avveckling av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2.

Ringhals AB har ett mellanlager i en byggnad som bedöms ha tillräcklig kapacitet för det långlivade avfall som uppkommer vid avveckling av Ringhals 1 och Ringhals 2.

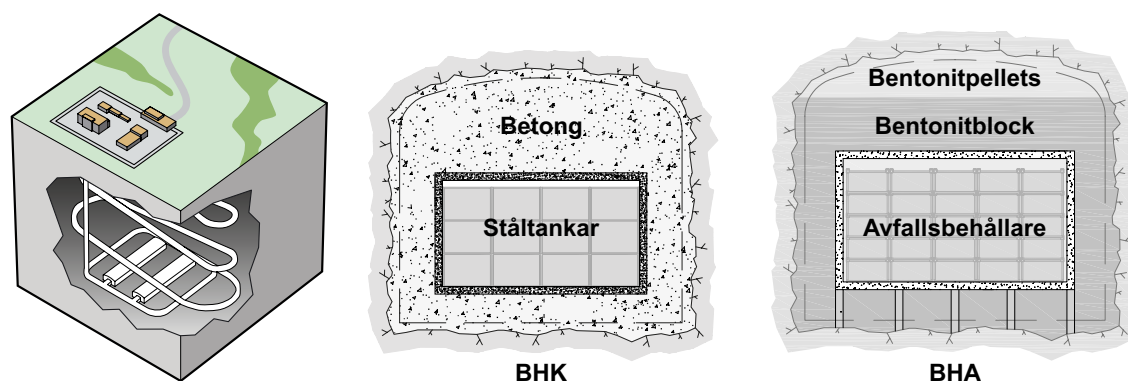
Barsebäck Kraft AB har ett mellanlager i en byggnad på kraftverksområdet, där långlivat avfall från Barsebäck 1 och Barsebäck 2 lagras. Avfallet består av segmenterade interndelar som placerats i ståltankar. För att kunna friklassa Barsebäck Kraft AB:s område innan SFL tas i drift, planeras ståltankarna att transporteras till ett externt mellanlager.

I Studsvik har AB SVAFO ett mellanlager för låg- och medelaktivt avfall (AM). Där har kapaciteten för mellanlagring utökats med en ny byggnad för detta (AUA).

Slutförvar för långlivat avfall – SFL

SKB planerar att slutförvara det långlivade avfallet på ett relativt stort djup för att undvika negativa effekter av permafrost på de tekniska barriärerna. SFL kommer att vara den slutförvarsanläggning i avfallssystemet som tas i drift sist. Enligt nuvarande planer kommer uppförandet inledas i mitten av 2040-talet och anläggningen driftsätts knappt tio år därefter för att sedan ha en drifttid på tio år. Platsen för förvaret är ännu inte beslutad. SFL:s förvarsvolym kommer att vara relativt liten i jämförelse med SKB:s övriga slutförvar. Den erforderliga lagringskapaciteten uppskattas till cirka 16 000 kubikmeter, varav cirka 5 000 kubikmeter beräknas komma från reaktorinnehavarna.

Utvecklingen av slutförvaret är i ett tidigt skede. SKB har tagit fram ett förvarskoncept som rymmer två förvarsdelar, en för metalliskt avfall, i huvudsak härdkomponenter (BHK) och en för historiskt avfall (BHA). Säkerheten efter förslutning baseras på fördröjning av radionuklider i de tekniska och naturliga barriärerna. Härdkomponenterna, vilka är metalliskt avfall, utgör cirka en tredjedel av volymen, men innehåller (initialt) huvuddelen av radioaktiviteten. För förvarsdelen för härdkomponenter, planerar SKB en utformning med en betongbarriär. Det historiska avfallet lagras och hanteras av AB SVAFO, Studsvik Nuclear AB och Cyclife Sweden AB i Studsvik. Ytterligare avfall tillkommer från sjukvård, forskning och industrier. I förvarsdelen för detta avfall föreslås den tekniska barriären utformas av en kombination av bentonit och betong. Förvarskonceptet illustreras i figur 2-4.



Figur 2-4. Preliminär anläggningsutformning (t v) och föreslaget förvarskoncept för SFL med en bergssal för härdkomponenter (BHK) och en bergssal för historiskt avfall (BHA).

2.2 Anläggningar inom KBS-3-systemet för använt kärnbränsle

KBS-3-systemet utgörs av de anläggningar som krävs för genomförande av KBS-3-metoden. Det använda kärnbränslet från de svenska kärnkraftverken mellanlagras i Clab, beläget i Oskarshamns kommun. I anslutning till Clab kommer en ny anläggningsdel att uppföras, för inkapsling av det använda kärnbränslet. Den kommer efter färdigställande att drivas integrerat som en anläggning, kallad Clink, för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle. Kärnbränsleförvaret för slutförvaring av det inkapslade använda kärnbränslet kommer att uppföras i Forsmark i Östhammars kommun. Där kommer allt använt kärnbränsle från den svenska kärnkraften att slutförvaras i kopparkapslar som omges av bentonit på cirka 500 meters djup i berget. Kapseltransportbehållare (KTB) kommer att tas fram för sjötransport av det inkapslade bränslet, från Clink till Kärnbränsleförvaret.

Centralt mellanlager för använt kärnbränsle – Clab

Det använda kärnbränslet transporteras från kärnkraftverken till Clab för mellanlagring, se figur 2-5. Anläggningen, som varit i drift sedan 1985, består av en mottagningsdel på marknivå och en förvaringsdel i berget, drygt 30 meter under markytan. En bränslehiss förbinder mottagningsdelen med förvaringsdelen. Förvaringsdelen består av två bergrum som båda innehåller fyra lagringsbassänger och en reservbassäng. Mottagningsdelen på marknivå innehåller bassänger och hanteringsutrustning för transportbehållare och använt bränsle.

Mellanlagringen av det använda kärnbränslet sker med cirka åtta meters vattentäckning i kassetter, som placeras i fastställda positioner i lagringsbassängerna. Det finns två typer av kassetter för använt kärnbränsle, normalkassetter och kompaktkassetter. De två kassettyperna har samma yttre mått, men en kompaktkassetten rymmer fler bränsleelement.

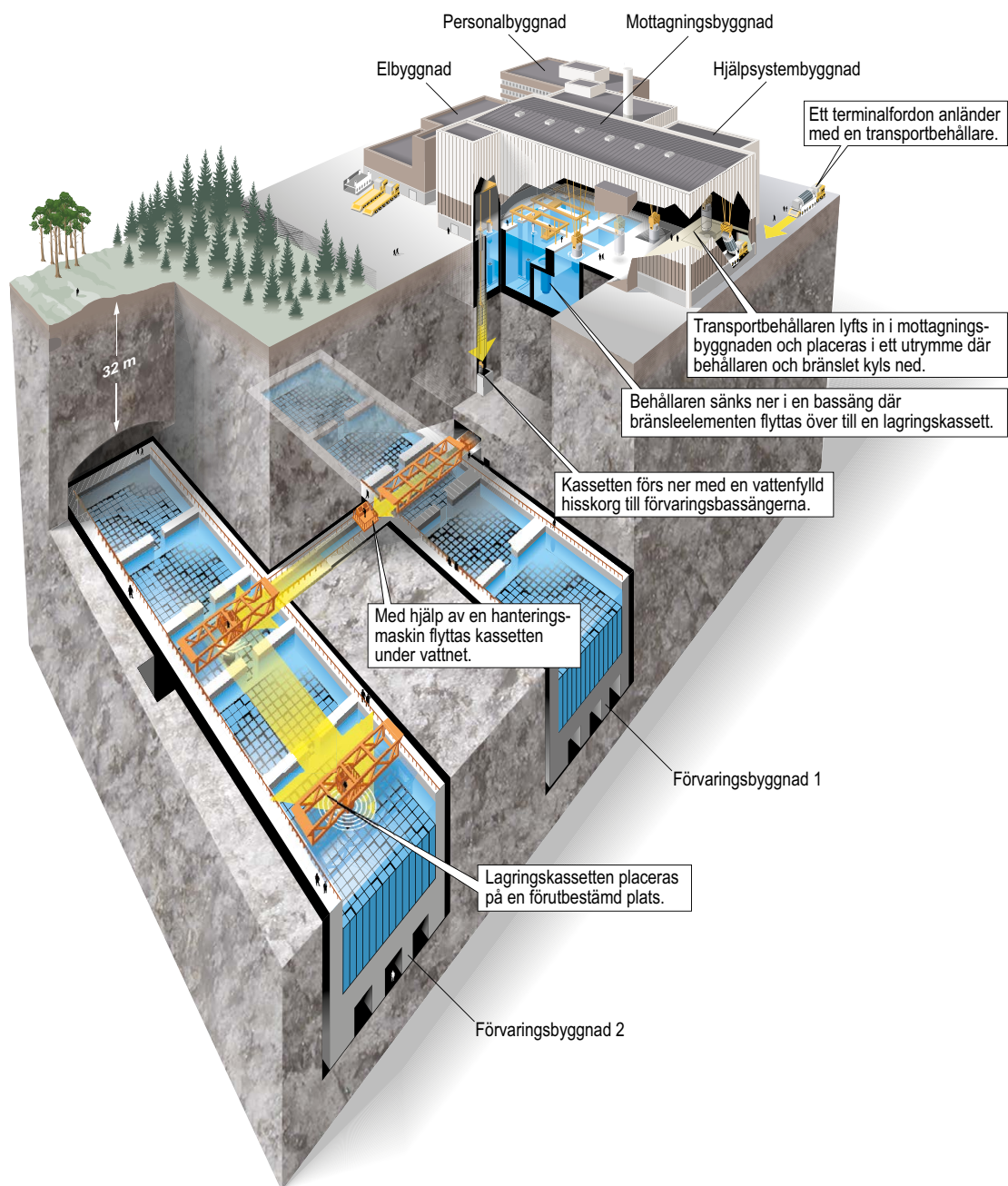
Regeringen har givit SKB tillstånd enligt KTL och tillåtlighet enligt MB för att öka den maximalt tillåtna mängden kärnbränsle för mellanlagring i Clab från 8 000 ton till 11 000 ton, räknat som ursprunglig mängd uran. Det finns utrymme att ta emot den ökade mängden bränsle i befintlig anläggning. Vid årsskiftet 2021/2022 fanns cirka 7 500 ton använt kärnbränsle mellanlagrat i Clab. Enligt nuvarande prognos kommer mängden att överskrida 8 000 ton under 2024.

Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle – Clink

Innan det använda kärnbränslet deponeras i slutförvaret, ska det kapslas in i kopparkapslar. Detta kommer att genomföras i en ny anläggningsdel i anslutning till Clab. De två anläggningsdelarna kommer att drivas integrerat som en anläggning, Clink. Vid inkapsling förs bränsle från sina positioner i mellanlagret till inkapslingsdelen där det torkas och placeras i kapselns insats. För varje kapsel väljs bränsle så att den totala resteffekten i varje kapsel inte blir för stor. Kapseln försluts och kontroller genomförs av kapselns yta och dess förslutning. Kapseln med bränsle placeras i en KTB för transport till Kärnbränsleförvaret.

Kapseln består av ett kopparhölje och en insats. Kopparhöljet, se figur 2-6, skyddar mot korrosion i förvaringsmiljön och insatsen ger skydd mot de mekaniska laster som kan uppkomma i förvaret. Insatserna, vilka det finns två typer av, är anpassade för bränsle från BWR respektive PWR. Det finns även andra bränsletyper som ska slutförvaras. Dessa kommer att kunna placeras i någon av insatstyperna.

De olika komponenterna till kapsel och insats produceras av olika underleverantörer. Efter leverans till SKB kommer de att kontrolleras, monteras och bearbetas innan de används för inkapsling av bränsle.



Figur 2-5. Clab huvudbyggnad med mottagningsdel och lagringsdel i två bergtrum för använt kärnbränsle.

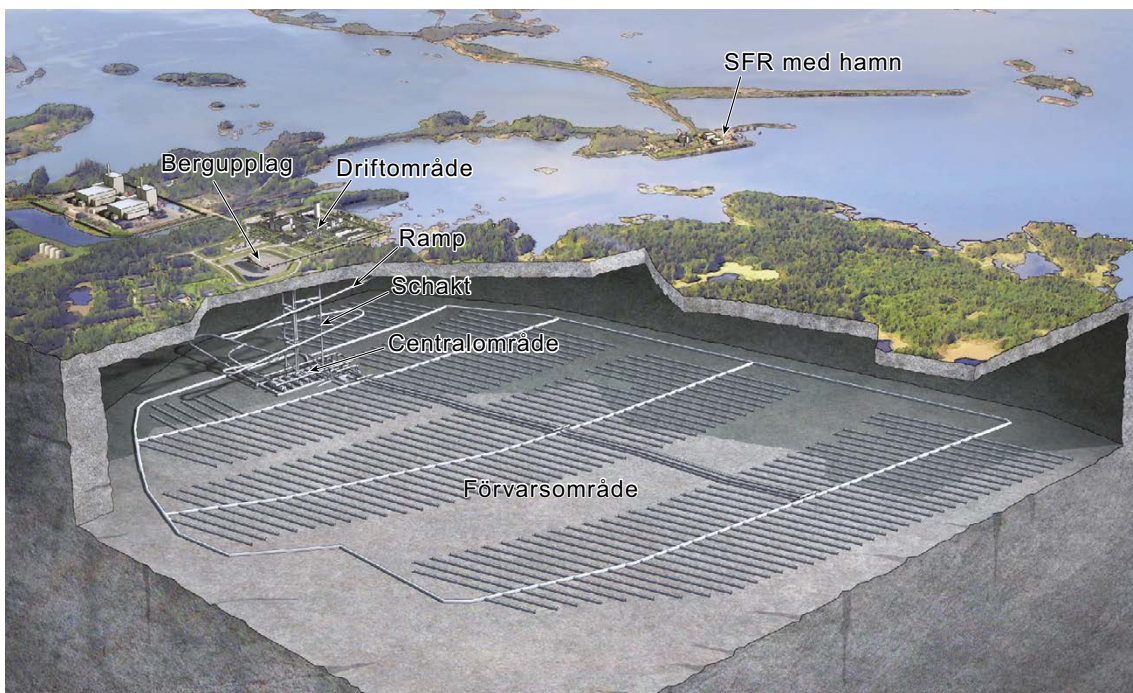


Figur 2-6. Kopparkapsel. Längd cirka 5 meter, diameter cirka 1 meter, koppertjocklek cirka 5 centimeter.

Kärnbränsleförvaret

Kärnbränsleförvaret kommer att uppföras i Forsmark i Östhammars kommun. Där kommer allt använt kärnbränsle från den svenska kärnkraften att slutförvaras. Anläggningen kommer att bestå av en ovanmarksdel och en undermarksdel, se figur 2-7. Anläggningen ovan mark består av driftområde, bergupplag och förråd. Förbindelsen mellan undermarksdelen och ovanmarksdelen utgörs av en ramp för fordonstransporter och schakt för hiss och ventilation.

Undermarksdelen utgörs av ett centralområde och ett flertal deponeringsområden. Deponeringsområdena utgör tillsammans förvarsområde. Varje deponeringsområde består av ett antal deponeringstunnlar med borrarade deponeringshål i tunnelgolven. Placeringen av deponeringstunnlarna, liksom avståndet mellan deponeringshålen, bestäms utifrån bergets egenskaper. Viktiga egenskaper är bland annat läget av stora deformationszoner, förekomst av stora eller mycket vattenförande sprickor och bergets värmeledningsförmåga. Förvarsdjupet kommer att ligga 450–500 meter under marknivån.



Figur 2-7. Illustration av möjlig utformning av Kärnbränsleförvaret i Forsmark.

Kapslarna förs med ett transportfordon via rampen ner till deponeringsnivån. Därefter lastas de om till en deponeringsmaskin och transporteras till en kapseldepå i avvaktan på slutlig deponering. Vid slutlig deponering lyfts kapsel med deponeringsmaskin och förs från kapseldepån till deponeringsområdet för slutlig deponering. Alternativt lastas kapsel över från transportfordon till deponeringsmaskin och transporteras direkt till deponeringsområdet för slutlig deponering.

Kapslarna placeras i deponeringshålen omgivna av bentonitlera. När samtliga kapslar i tunneln deponerats, fylls tunneln igen med lera som kommer att svälla vid kontakt med vatten. Slutligen försluts deponeringstunneln med en betongplugg. När allt bränsle har deponerats fylls övriga utrymmen igen och anläggningarna ovan mark avvecklas.

2.3 Transportsystemet

Transportsystemeten utgörs av ett fartyg, terminalfordon och olika typer av transportbehållare för bränsle och radioaktivt avfall, se figur 2-8.

Fartyget m/s Sigrid, som togs i drift 2014, används för transport av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. Fartyget har dubbla bottenar och dubbel bordläggning. Konstruktionen skyddar lasten vid en eventuell grundstötning eller kollision. Normalt gör fartyget mellan 30 och 40 resor per år mellan kärnkraftverken, Studsvik, SFR och Clab.

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall transporteras från kärnkraftverken, Clab och Studsvik till SFR. Lågaktivt avfall behöver ingen strålskärning och kan därför transporteras i ISO-containrar. Medelaktivt avfall kräver däremot strålskärning och merparten gjuts in i betong eller bitumen vid kärnkraftverken. Avfallet transporteras i avfallstransportbehållare (ATB) med 7–20 centimeter tjocka väggar av stål, beroende på hur radioaktivt avfallet är.

För närvarande transporteras en del av det långlivade avfallet, bland annat styrstavar från BWR, från kärnkraftverken till Clab. Det transporteras i en transportbehållare med cirka 30 centimeter tjocka väggar av stål för att avskärma innehållets gammastrålning. Även det använda kärnbränslet transporteras från kärnkraftverken till Clab i liknande behållare med cirka 30 centimeter tjocka stål väggar. Eftersom bränslet även avger neutronstrålning och värme är dessa behållare också utrustade med ett lager plast för neutronsärmning och kylflänsar för kylning.



Figur 2-8. SKB:s transportsystem utgörs idag av fartyget m/s Sigrid, terminalfordon samt avfallstransportbehållare (ATB) för kortlivat radioaktivt avfall, härdkomponenter (TK), och använda bränsleelement (TB).

Arbete pågår med att renovera och uppgradera ATB:er för att ge möjlighet att transportera fler typer av radioaktivt avfall. Vidare tas det fram transportbehållare för bland annat större hårdkomponenter i ståltank.

För transport av använt kärnbränsle tas en ny transportbehållare fram för att uppfylla de ökade säkerhetskraven. Den nya transportbehållarens utformning skiljer sig från nuvarande och därför görs en anpassning på kärnkraftverken och Clab för hanteringen av dessa.

I framtiden kommer det även att gå transporter av inkapslat kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret. Transportsystemet kommer därför att kompletteras med transportbehållare för inkapslat använt kärnbränsle.

2.4 Kärnämneskontroll

Kärnämneskontroll (Safeguards) syftar till att säkerställa att kärnämnen och kärntekniska anläggningar inte används för framställning av exempelvis kärnvapen. I och med att Sverige anslutit sig till icke-spridningsfördraget (NPT) ska alla kärntekniska anläggningar uppfylla de krav som ställs på kärnämneskontroll. Det innebär bland annat att det ska finnas administrativa system för bokföring och redovisning av kärnämnesinventariet i anläggningarna samt tekniska system för kontroll och bevakning av att kärnämne inte avleds. All hantering och bearbetning av kärnämne ska redovisas och det ska inte finnas någon möjlighet att bedriva otillåten verksamhet i anläggningarna.

Aspekterna på kärnämneskontroll beaktas redan i konstruktionsskedet för SKB:s nya kärntekniska anläggningar så att tillsyn och kontroll underlättas under driftskedet. Arbetet syftar till att berörda intressenter ska vara medvetna om de krav som finns för kärnämneskontroll så att aktiviteter, konstruktion och anläggningsuppförande planeras effektivt. En viktig del av kontrollen av slutförvaren är, att kunna verifiera att en anläggning har byggts i enlighet med redovisade ritningar. Detta behövs för att kontrollorganen ska kunna förvissa sig om att det inte finns utrymmen eller vägar ut från anläggningen som inte har redovisats.

När KBS-3-systemet i sin helhet tas i drift kommer samtliga ingående anläggningar och transportsystemet att omfattas av ett sammanhållet system för kärnämneskontroll för att säkerställa att inget kärnämne avleds. Kontroller kommer att behövas för att verifiera det kärnämne som ska slutförvaras, för att säkerställa att det kapslas in och att det slutligen placeras i slutförvar.

Förutom det använda kärnbränslet finns det visst avfall från svenska historiska kärntekniska anläggningar som innehåller små mängder kärnämne. Även detta kärnämne omfattas av kärnämneskontroll. För närvarande lagras avfallet vid Studsvik där AB SVAFO är tillståndshavare. Metoder för verifiering, system för märkning, paketering, sigillhantering, transport och slutförvaring med hänsyn till avfallens särart behöver utformas.

Myndigheterna och kontrollorganen har satt upp regelverk för kärnämneskontrollen, men dessa regelverk är inte fullt utvecklade för inkapslingsanläggningar eller geologiska slutförvar. SKB deltar sedan flera år i internationella samarbeten med bland andra IAEA, EU-kommissionen och SSM för att bidra till utvecklingen av principer och metoder för kärnämneskontroll i dessa nya typer av anläggningar. SKB har tagit fram två utkast till grundläggande tekniska anläggningsbeskrivningar för Kärnbränsleförvaret respektive Clink som ligger till grund för IAEA:s och EU-kommissionens arbete med kontrollåtgärder. Dokumenten uppdateras efterhand som anläggningarna optimeras och efter dialog och synpunkter från IAEA och EU-kommissionen.

För att kontrollåtgärder ska kunna sättas in där det är lämpligast, pågår ett arbete tillsammans med kontrollorganen om så kallade Equipment Infrastructure Requirements (EIR). Där framför SKB till IAEA:s kontrollorgan förutsättningar och lämplighet ur ett drift- och säkerhetsperspektiv. Det är viktigt att tekniska utformningen i anläggningarna och transportsystemet görs parallellt med utvecklingen av principer och metoder för kärnämneskontroll, så att anläggning och transportsystem anpassas för en säker och effektiv kärnämneskontroll under driftskedet. Efter förslutning av slutförvaren kan kontrollåtgärderna komma att omfatta eventuell hantering på markytan. SKB bedömer dock att anläggningarna inte behöver utformas speciellt med avseende på det.

3 Plan för genomförande

I detta kapitel redovisas planeringen för att uppföra och ta i drift nya och utbyggda anläggningar. Reaktorinnehavarnas och SKB:s handlingsplaner avseende avveckling av kärntekniska anläggningar beskrivs också. Kapitlet inleds med en övergripande redovisning av planerna för genomförandet av kärnavfallsprogrammet. Det avslutas med handlingsalternativ och åtgärder för att hantera eventuella större förändringar av planeringsförutsättningarna.

SKB:s verksamhet planeras långsiktigt utifrån genomförandeplanen i Fud-programmet, som omfattar samtliga anläggningar ända tills de avvecklas, och utifrån operativa femårsplaner som uppdateras varje år. Planeringsdirektiv baserat på kända förutsättningar samt strategiska mål utgör grunden för dessa planer. Säker drift av SKB:s anläggningar har högsta prioritet och vid eventuella resurskonflikter ges alltid förtur till anläggningar i drift. SKB behöver ha flexibilitet i sin planering eftersom verksamheten måste kunna anpassas till händelser i omvärlden, så som beslut från reaktorägarna eller från myndigheter, vilket kan medföra nya planeringsförutsättningar för SKB. Den tidigarelagda stängningen av flera reaktorer i Ringhals och Oskarshamn innebär behov av tidigarelagda transporter av använt kärnbränsle från dessa reaktorer till Clab, och på sikt även av låg- och medelaktivt radioaktivt avfall från avvecklingen. Behovet av att så snart som möjligt kunna ta ett utbyggt SFR i drift har ökat för att inte behöva mellanlagra stora mängder rivningsavfall under lång tid.

SKB har erhållit viktiga regeringsbeslut i flera ärenden under den gångna Fud-perioden, se avsnitt 1.2.2. Besluten innebär att enskilda milstolpar har passerats, men tillståndsärendena med koppling till MB och KTL fortsätter och kommer att pågå under flera år. Hur lång tid varje ärende tar innan verkställighetsbeslut fattats eller dom meddelats, kan inte anges på förhand.

Fud-program 2022 utgår från regeringsbesluten om tillåtlighet enligt MB och tillstånd enligt KTL för utökad mellanlagringskapacitet i Clab, utbyggnaden av SFR samt KBS-3-systemet och förutsättningarna för de fortsatta tillståndsprocesserna. SKB har i planeringen av verksamheten dessutom ett försiktigt förhållningssätt relativt de olika överklaganden som förväntas. Utifrån dessa förutsättningar har SKB antagit följande övergripande strategiska inriktning för planering av de tre tillståndsprövningarna:

- Ansökan om tillstånd för utökad mellanlagring i Clab, upp till 11 000 ton prioriteras före KBS-3-systemet och SFR-utbyggnaden i den fortsatta KTL- och miljöprövningen. Målet är att SKB ska erhålla ett nytt tillstånd innan det för 8 000 ton är fullt utnyttjat.
- Utbyggnaden av SFR prioriteras före KBS-3-systemet både i KTL- och miljöprövningen. SFR-utbyggnaden, som behövs för att kunna hantera avfall från avvecklingen av kärnkraftsreaktorer, är mindre i både omfattning och komplexitet och bedöms ge värdefulla erfarenheter till uppförandet av Kärnbränsleförvaret.

Det fortsatta arbetet med SFL har fått lägre prioritet. Fokus under Fud-perioden ligger på arbete med inventariet, preliminära acceptanskriterier och utredningar om avfallsbehållare. När nödvändiga data finns tillgängliga om inventariet, vilket även omfattar det historiska avfallet, kommer de att utgöra grunden för en analys av säkerheten efter förslutning och förutsättning finns då för att kunna ansöka om tillstånd och tillåtlighet för förvaret. Detta innebär att byggstarten för SFL flyttas fram flera år.

3.1 Genomförandeplan för kärnavfallsprogrammet

SKB:s planering för utbyggnad och uppförande av nya anläggningar utgår från de olika tillstånd och medgivanden som erfordras enligt den stegvisa process, där stegen utgör milstolpar, se avsnitt 1.1.5.

Driftperioden för slutförvaren och Clink inleds med provdrift, som innebär att radioaktivt avfall hanteras och deponeras. Efter provdriften övergår verksamheten i en förvaltningsfas under så kallad rutinmässig drift. Avveckling och förslutning av anläggningarna sker därefter under avvecklingsfasen.

Den som har tillstånd att inneha eller driva en kärnteknisk anläggning ska minst vart tionde år göra en ny systematisk helhetsbedömning av säkerhet och strålskydd. I samband med dessa görs också en genomgång och sammanställning av läget inom de kunskapsområden som är väsentliga för strålsäkerheten.

Figur 3-1 visar den övergripande aktivitets- och milstolpeplanen för kärnavfallsprogrammet, inklusive milstolpar för ansökningar i den fortsatta tillståndsprocessen. I figuren visas också avfallsströmmar och deras utsträckning i tiden.

3.2 Planeringen för låg- och medelaktivt avfall

De slutförvar som SKB planerar att etablera för låg- och medelaktivt avfall omfattar en utbyggnad av SFR och uppförande av SFL. Anläggningarna beskrivs i kapitel 2.

Reaktorinnehavarna av de reaktorer som avvecklas innan det utbyggda SFR tas i drift, har för avsikt att anordna mellanlager för det kortlivade rivningsavfallet. Det långlivade rivningsavfallet kommer att mellanlagras antingen lokalt på kraftverken eller på annan plats.

Avvecklingsplaneringen för de sju reaktorerna som kommer att avvecklas under 2020-talet bedrivs av respektive reaktorinnehavare. SKB medverkar med de olika avvecklingsprojekten i centrala frågor som rör avfallshantering, exempelvis acceptanskriterier och typbeskrivningar för rivningsavfall och transporter.

3.2.1 Övergripande planering

De verksamheter som planeras för kortlivat respektive långlivat låg- och medelaktivt avfall sammanfattas i avsnitt 3.2.2 respektive 3.2.3. Figur 3-2 illustrerar en schematisk aktivitets- och milstolpeplan för hanteringen av låg- och medelaktivt avfall. För att tydliggöra kopplingen mellan avvecklingen av reaktorerna respektive av Clink, SFL och SFR ingår även dessa i figuren.

3.2.2 Kortlivat avfall

Mellanlagring av kortlivat avfall

Arbetet med att nedmontera och riva de sju första reaktorerna startar innan det utbyggda SFR är klart för drift. Barsebäck Kraft AB, OKG Aktiebolag, Ringhals AB och Vattenfall AB planerar därför att mellanlagra det kortlivade rivningsavfallet huvudsakligen på kraftverksområdena, men även andra platser kan bli aktuella.

Det kommer även att finnas behov av att mellanlagra driftavfall under perioden då utbyggnaden av SFR pågår, då det kommer att vara deponeringsstopp i anläggningen. Dessutom är en förvarsdel i det befintliga SFR, bergssalen för lågaktivt avfall (BLA), nästintill full och det planeras inte att deponera mer i denna del förrän efter att utbyggnaden är klar.

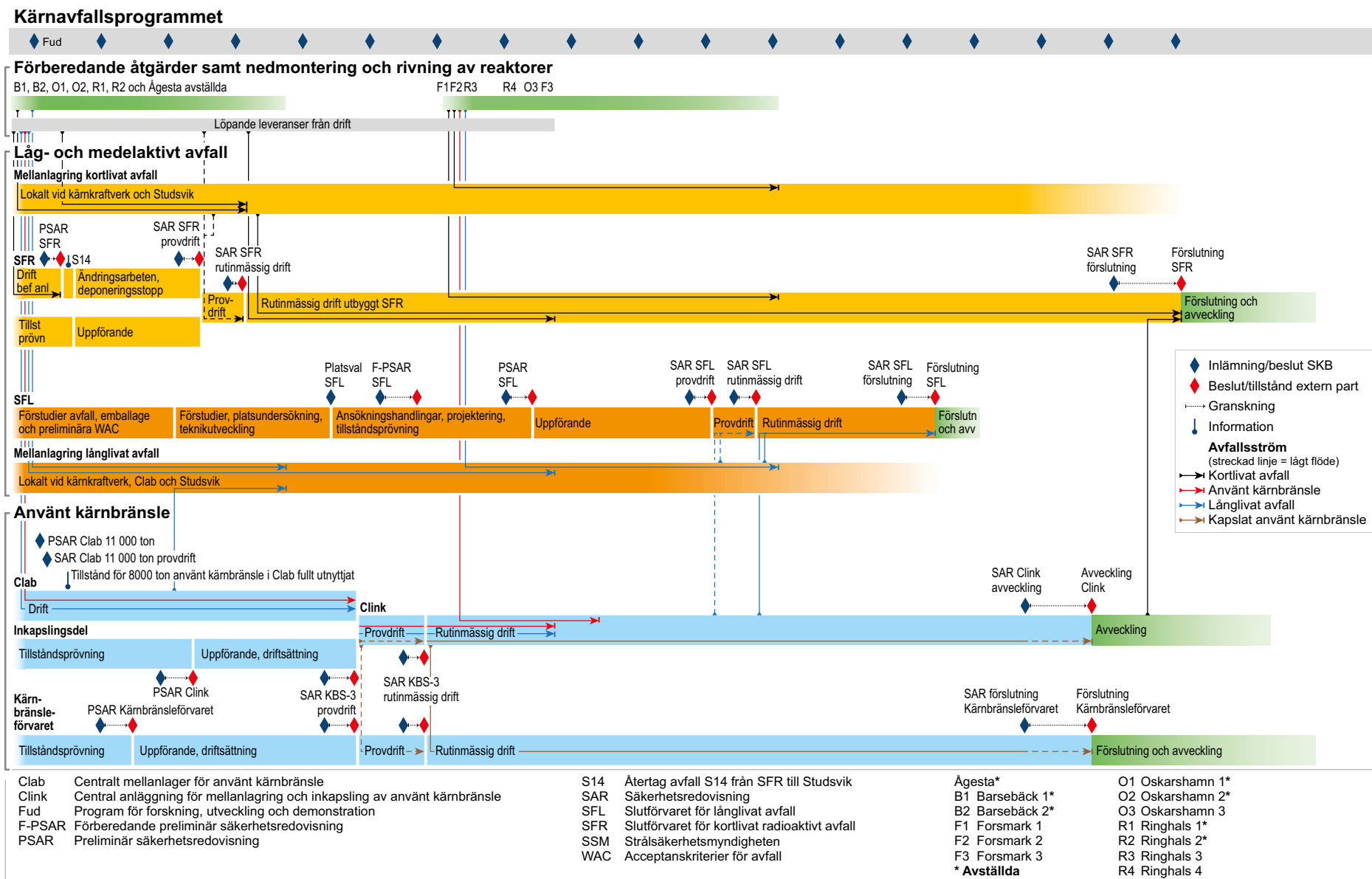
Strategin för hanteringen av reaktortankarna från BWR inför deponering, är segmentering och placering i kokiller. De segmenterade reaktortankarna kommer att mellanlagras med övrigt medelaktivt kortlivat rivningsavfall.

Utbyggnad av SFR

Regeringen har meddelat tillåtlighet enligt MB och tillstånd enligt KTL för utbyggnaden av SFR. Enligt nuvarande planering förväntas utbyggnaden kunna starta i mitten av 2020-talet och provdrift inledas i början av 2030-talet. En översiktlig aktivitetsplan för utbyggnad av SFR presenteras figur 3-3.

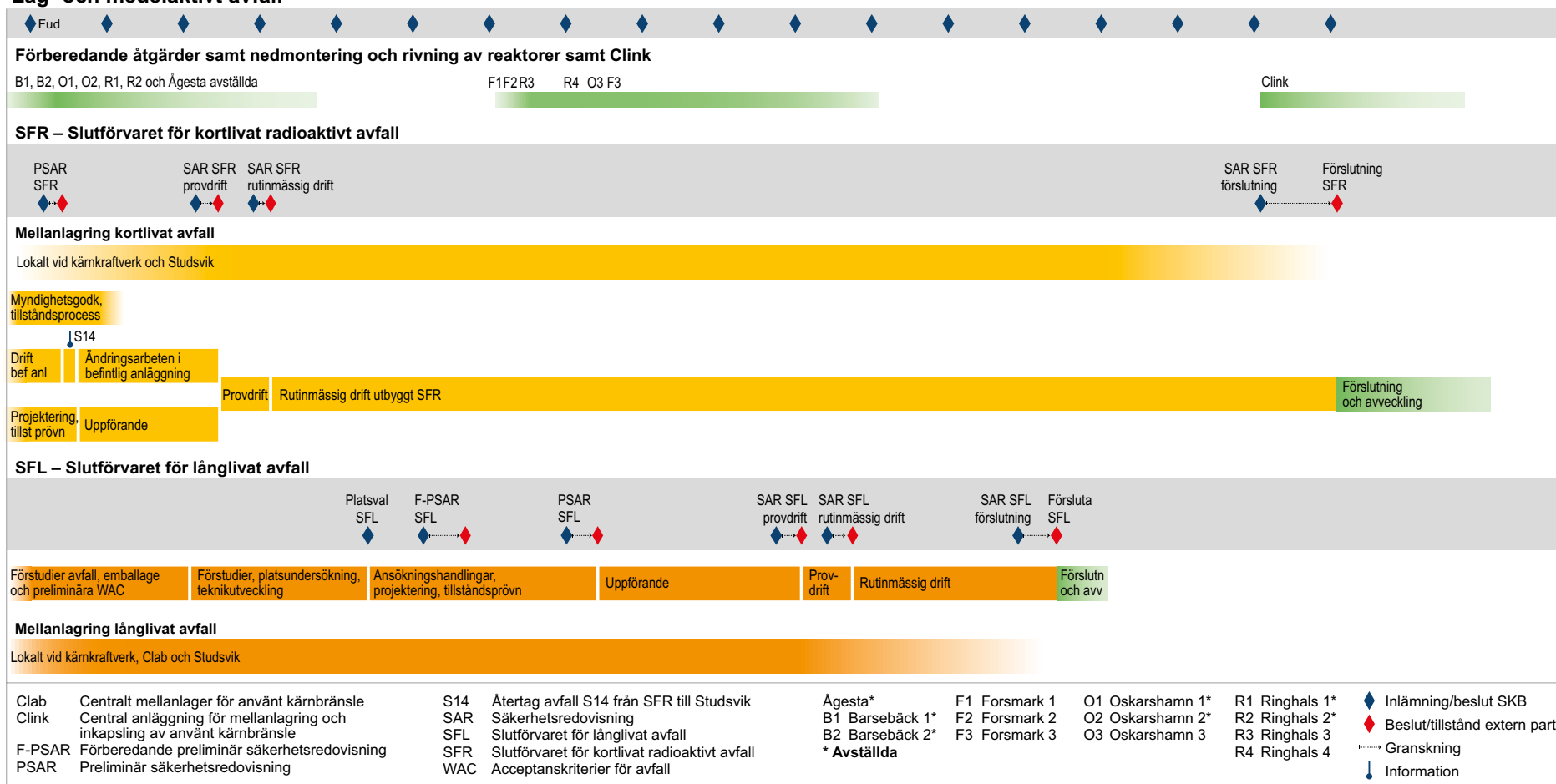
Regeringens beslut innebär att tillståndsprocessen går vidare med villkorsförhandling i MMD i slutet av 2022. Steget därefter är inlämnande av ansökan om uppförande med en PSAR till SSM. SKB:s uppgift att besvara frågor från myndigheterna samt förbereda och medverka i villkorsförhandlingen.

Samtidigt påbörjar SKB upphandling av samverkanspartners för fortsatt projektering av bergutrymmen och installationer av system i anläggningen. Även förberedande arbeten inför byggstart och detaljundersökningar genomförs. Efter erhållen dom med villkor påbörjas upphandling av entreprenader och utbyggnaden av SFR påbörjas.

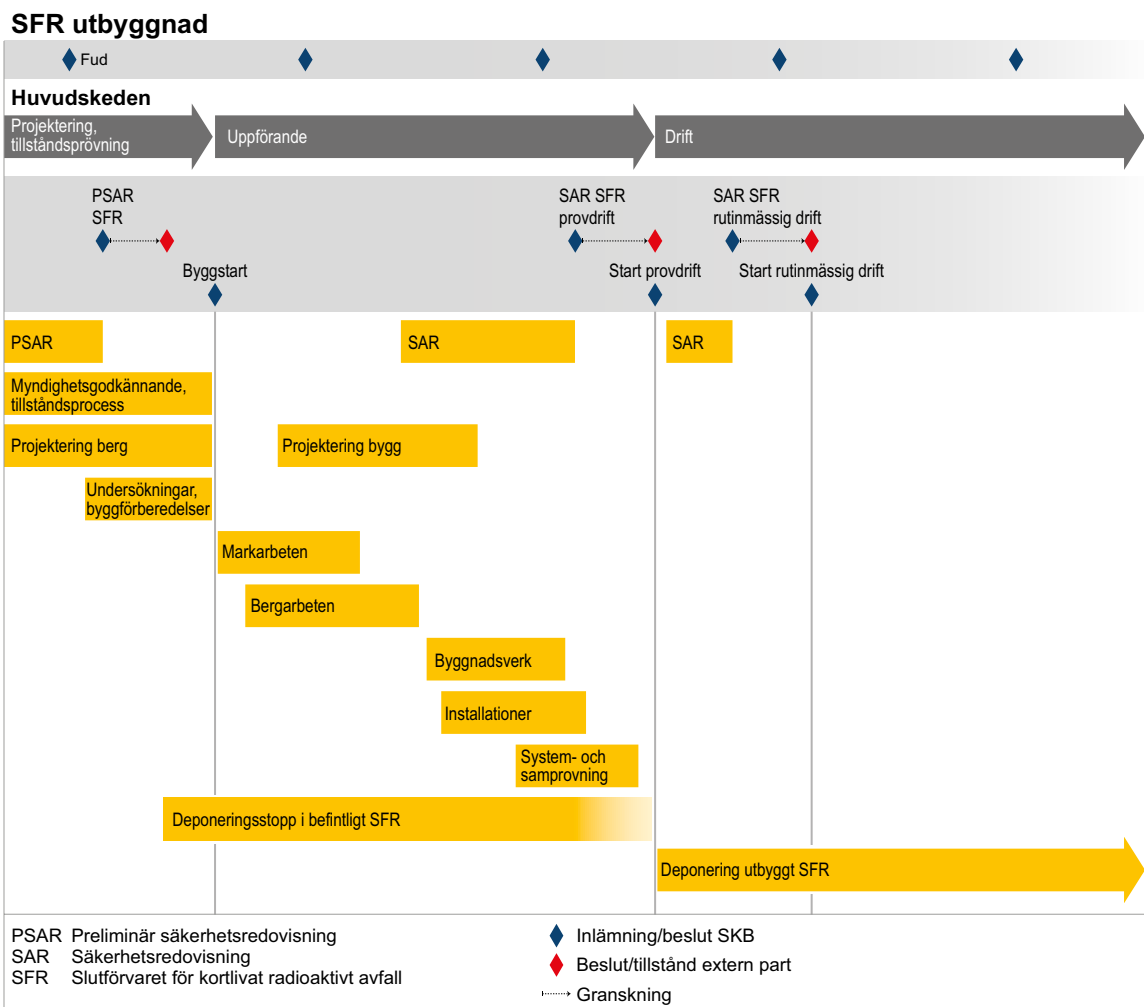


Figur 3-1. Aktivitets- och milstolpeplan för SKB:s kärnavfallsprogram och planer för avveckling av reaktorer. I figuren redovisas också avfallsströmmar och deras utsträckning i tiden.

Låg- och medelaktivt avfall



Figur 3-2. Aktivitets- och milstolpeplan för låg- och medelaktivt avfall samt planer för avveckling av kärnkraftverken.



Figur 3-3. Aktivitets- och milstolpeplan för utbyggnad av SFR.

Uppförande och driftsättning av utbyggt SFR

Skedet omfattar aktiviteterna byggnation, provdrift och överlämning till rutinmässig drift. Under delar av byggförberedelserna och under uppförandet, kommer SKB att införa deponeringsstopp i anläggningen.

Samtidigt som SFR byggs ut kommer en uppgradering av den befintliga anläggningen att göras, bland annat med hänsyn till att drifttiden har förlängts i förhållande till den ursprungligt planerade. SKB planerar att lämna in en förnyad SAR inför provdrift i slutet av 2020-talet. Provdrift antas kunna starta ett år senare. Därefter kommer SKB att lämna in en kompletterad SAR inför rutinmässig drift.

Konsekvenserna av tidigare respektive senare driftsättning av SFR presenteras i avsnitt 3.7.2.

3.2.3 Långlivat avfall

Mellanlagring av långlivat avfall

SKB planerar att ta SFL i drift under 2050-talet. Då flera reaktorer kommer att avvecklas innan slutförvaret står färdigt, behöver långlivat avfall som uppstår vid avvecklingen mellanlagras. Reaktorinnehavarna bedömer idag att det går att skapa tillräcklig mellanlagringskapacitet lokalt vid kärnkraftverken.

Befintliga och planerade mellanlager för långlivat avfall nyttjas tills det finns möjlighet att transportera avfallet till SFL. För detta behövs, förutom ett driftsatt SFL, även en ny typ av licensierad avfallstransportbehållare.

Behandling av långlivat avfall

Det kan bli aktuellt med konditionering av det långlivade avfallet inför deponering i SFL. Innan slutlig konditionering kan genomföras, behöver acceptanskriterier fastställas för avfallet. Utvecklingen av preliminära acceptanskriterier fortsätter under Fud-perioden, utifrån bland annat resultaten från den genomförda säkerhetsvärderingen. Två huvudspår för det långlivade avfallet ingår i nuvarande planering. Det ena är stabilisering av metalliskt avfall från kraftverken i ståltankar och det andra är omlastning och konditionering av avfall från AB SVAFO och Studsvik Nuclear AB i behållare anpassade för SFL. Konditionering kan inte göras förrän acceptanskriterierna är fastställda. Enligt nuvarande planer kommer, vid behov, slutlig konditionering att göras i samband med deponeringen i SFL.

Slutförvaret för långlivat avfall – SFL

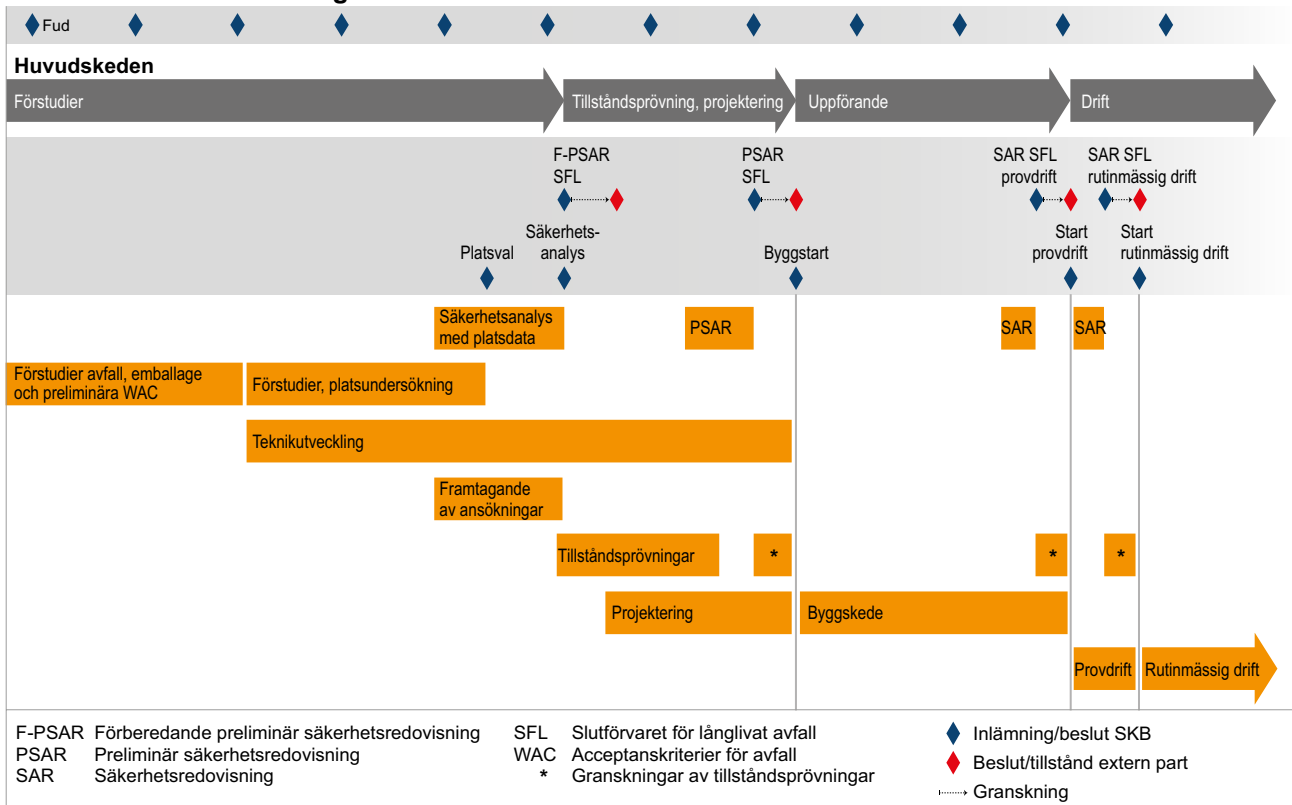
SFL är det förvar som SKB planerar att ta i drift sist. Det återstår att passera flera viktiga milstolpar, såsom platsundersökningar och val av plats, analys av säkerheten efter förslutning, genomförd tillståndsprocess och slutligen uppförande. En översiktlig aktivitetsplan för arbetet med SFL presenteras i figur 3-4. Planen bygger på ett scenario där SFL placeras på en av de platser som SKB har kännedom om sedan tidigare. Skulle mer omfattande platsundersökningar krävas bedömer SKB att tidpunkten för driftsättning av SFL kommer att skjutas framåt i tiden. Ett sådant scenario utvecklas vidare i avsnitt 3.7.4. SKB planerar att under 2030-talet lämna in ansökningar enligt KTL och MB om att få uppföra, inneha och driva SFL. Enligt planeringen kommer slutförvaret att kunna tas i drift under 2050-talet och behöva vara i drift i cirka tio år.

Utvärdering av säkerheten efter förslutning av SFL

Resultaten av genomförd säkerhetsvärdering visar vilka avfalls kategorier som bidrar mest till de beräknade långsiktiga strålsäkerhetskONSEKVENSerna, vilket ger underlag till arbetet med att utveckla acceptanskriterier. Värderingens analyserade känslighetsfall för olika barriärlösningar utgör också underlag till fortsatt arbete med att utveckla de tekniska barriärerna.

Säkerhetsvärderingen utgör basen för att identifiera områden för fortsatt forskning inför kommande fullständiga säkerhetsanalyser. Dessutom ger den underlag till den kommande lokaliseringsprocessen.

SFL – Slutförvaret för långlivat avfall



Figur 3-4. Aktivitets- och milstolpeplan för arbetet inför driftsättning av SFL.

Inventarium och acceptanskriterier för SFL

Inför kommande säkerhetsanalyser för SFL behövs bättre information om avfallets egenskaper. Avfallsproducenterna planerar, särskilt för det historiska avfallet, ett arbete för att karakterisera avfallet (radiologiska, kemiska och fysikaliska egenskaper) med övergripande mål att få ett bättre specificerat inventarium. Karakteriseringen är nödvändig både för att ta fram acceptanskriterier, anpassa behandlingsmetoder samt för utvecklingen av behållare och anläggningsutformning.

Arbetet, som genomförs av SKB och avfallsproducenterna i samarbete, syftar även till att ge underlag och vägledning för avfallsproducenternas fortsatta hantering av avfallet.

Lokalisering av plats för SFL

SKB har sedan tidigare lagt fast grundläggande förutsättningar för platserna för slutförvar för radioaktivt avfall:

- Säkerheten under drift och efter förslutning samt påverkan på miljön måste uppfylla kraven i KTL och MB.
- Det lokala politiska och opinionsmässiga stödet behöver vara brett och stabilt.

SKB planerar att driva en stegvis lokaliseringsprocess med målsättningen att välja plats för SFL i mitten av 2030-talet. Målsättningen är att driva en öppen och transparent process i samråd med SSM, berörda kommuner och andra intressenter, där förutsättningarna för olika aktörer tidigt är klarlagda och där processens olika steg är förankrade och kommunicerade.

Den kunskap om Sveriges geologi som förvärvats genom SKB:s tidigare lokaliseringsprocesser utgör grund för arbetet. Underlaget utgörs av alla områden i Sverige med data som behövs för värdering av säkerhet på 400–700 meters djup, exempelvis Forsmark, Simpevarp/Laxemar/Äspö och samtliga så kallade typområden från lokaliseringsprocessen för Kärnbränsleförvaret. En systematik baserad på en indelning i lokaliseringsfaktorer har tidigare utarbetats och använts av SKB för Kärnbränsleförvaret. Erfarenheterna från detta kommer att appliceras på lokaliseringsprocessen för SFL. Bland annat kommer samma huvudgrupper av faktorer vid värdering och jämförelser av lokaliseringsalternativ att användas:

- Säkerhet efter förslutning.
- Teknik för genomförande.
- Miljö och hälsa.
- Samhällsaspekter.

Förutom resultaten från säkerhetsvärderingen, utgör SSM:s och MMD:s yttranden till regeringen i KBS-3-ärendet viktiga underlag för utformningen av det fortsatta arbetet.

Ansökningar, uppförande, drift och förslutning av SFL

SKB planerar att lämna in tillståndsansökningar enligt KTL och MB för SFL under 2030-talet. Efter inlämnandet fortsätter arbetet med bland annat systemprojektering och detaljprojektering. Uppförande och provdrift följs av rutinmässig drift. Förslutning av SFL sker då allt mellanlagrat långlivat avfall samt det långlivade avfallet från avvecklingen av det sista kärnkraftverket har deponerats. Innan förslutningen verkställs behöver SKB säkerställa att det avfall som kommer från avvecklingen av Clink är lämpligt för SFR och således inte behöver slutförvaras i SFL.

3.3 Planeringen för använt kärnbränsle

Den enda anläggningen som är i drift i KBS-3-systemet är Clab. De anläggningar som återstår att uppföra är en inkapslingsdel i anslutning till Clab (drivs integrerat med Clab och benämns då Clink) samt Kärnbränsleförvaret, där det använda kärnbränslet ska deponeras. Anläggningarna beskrivs i kapitel 2.

I detta avsnitt beskrivs den övergripande planeringen för kommande aktiviteter för KBS-3-systemets anläggningar:

- Planering och förberedelser för utökning av mellanlagringen i Clab från 8 000 ton till 11 000 ton använt kärnbränsle.
- Slutförande av tillståndsprovningarna.
- Säkerhetsredovisningar för anläggningarna.
- Planering, projektering, uppförande och driftsättning av
 - slutförvarsanläggningen i Forsmark och produktionssystemen för buffert och återfyllningsmaterial samt valvplugg,
 - anläggningen för mellanlagring och inkapsling (Clink) i Oskarshamn och produktionssystemet för kapslar.
- Fortsatt forskning och teknikutveckling.

Primära avnämare av den forskning och teknikutveckling som genomförs för KBS-3-systemet är de två anläggningsprogrammen för Clink och Kärnbränsleförvaret, arbetet med säkerhetsredovisningar samt produktionen av de tekniska barriärerna.

3.3.1 Övergripande planering

Etableringen av KBS-3-systemets anläggningar indelas i följande huvudskeden: tillståndsprovning (och projektering), uppförande, provning och driftsättning, drift samt avveckling och förslutning. De verksamheter som planeras under olika skeden sammanfattas för respektive anläggning i avsnitt 3.3.2 till 3.3.4. I figur 3-5 åskådliggörs vissa huvudaktiviteter och teknikutvecklingens olika leveransfaser, det vill säga huvudsakliga perioder för utvecklingen av teknikkomponenter och lösningar. Andra milstolpar avser utvecklingen i tillståndsärendet.

Under pågående tillståndsprovning anpassas projektens framdrift till de osäkerheter som behöver beaktas i projektplaneringen samt eventuell ny information från myndigheter. De närliggande milstolparna är

- huvudförhandling om tillstånd och villkor i MMD,
- inlämnande till SSM av PSAR inför uppförande av Kärnbränsleförvaret respektive inkapslingsdelen i Clink.

Allteftersom de tillståndsrelaterade milstolparna passeras, intensifieras arbetet. Ett omfattande planeringsarbete pågår avseende projekteringar av anläggningsdelar och tekniska system.

Enligt planerna inleds uppförandet av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen i Clink under andra hälften av 2020-talet, för att tas i drift under andra hälften av 2030-talet.

Innan uppförande av de anläggningsdelar som har betydelse för säkerheten i Kärnbränsleförvaret kan inledas, ska en ansökan om uppförande lämnas in till SSM. Ansökan planeras innehålla PSAR, Suus (beskrivning av säkerheten under uppförande) samt planer för fortsatt forskning och utveckling till kommande steg i arbetet med säkerhetsredovisningar.

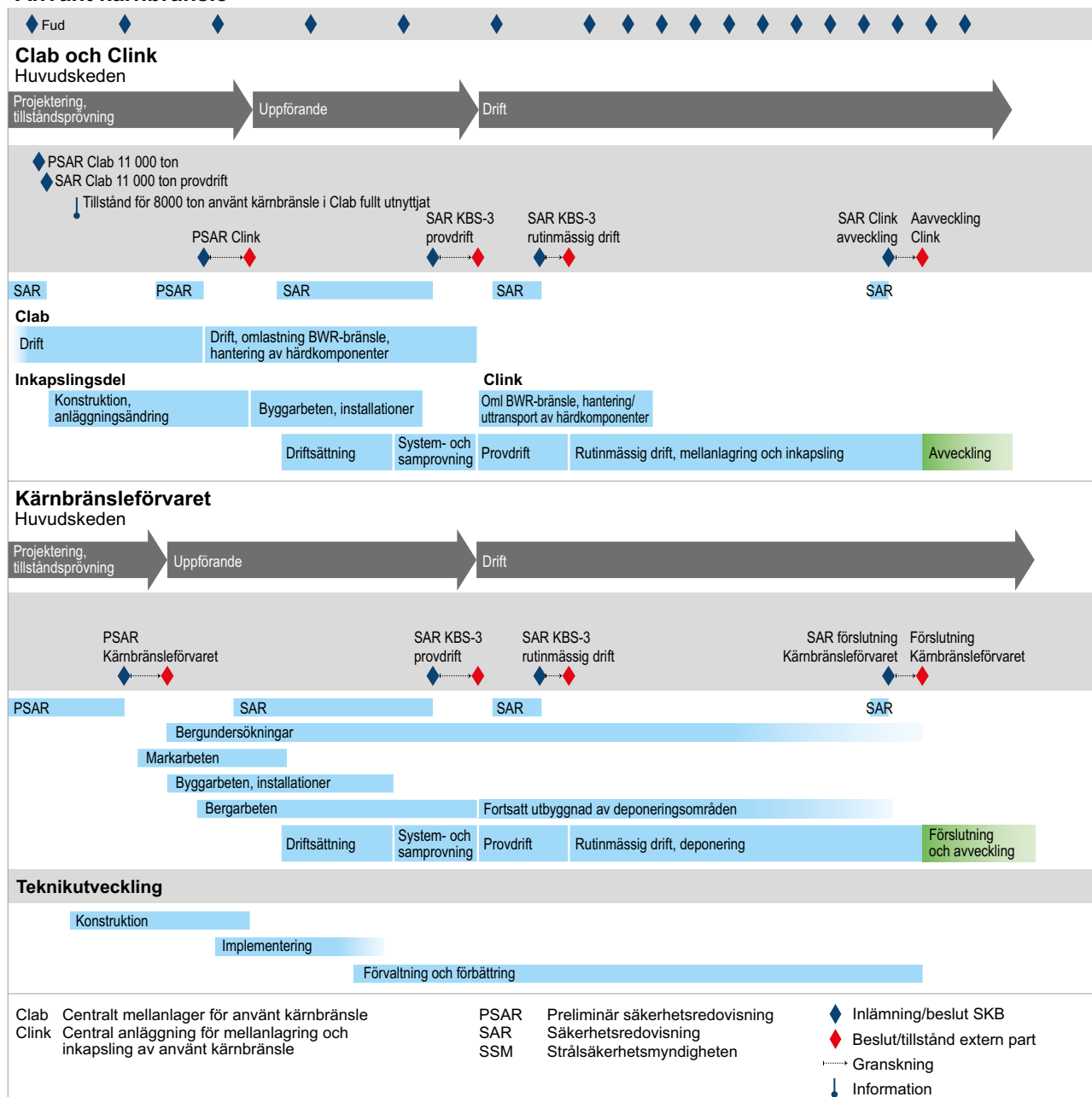
Konsekvenser av förändrad tidpunkt för driftsättning av Kärnbränsleförvaret och Clink diskuteras i avsnitt 3.7.5.

3.3.2 Mellanlagring

Enligt gällande planer kommer provdriften av Kärnbränsleförvaret och Clink att inledas under andra hälften av 2030-talet. I och med detta kan även utlastning av mellanlagrat använt kärnbränsle inledas. För att kunna ta emot det använda kärnbränslet som uppkommer i Clab fram till dess krävs, förutom utökning av den tillståndsgivna mängden för mellanlagring, åtgärder för att frigöra förvaringsutrymme för det använda kärnbränslet. Lagringskapaciteten utökas genom att lasta om det använda kärnbränslet som lagras i normalkassetter till kompaktkassetter. Kompaktkassetterna har samma dimensioner som normalkassetterna, men rymmer fler bränslelement. Ytterligare åtgärd som behövs är urlastning av hårdkomponenter för mellanlagring på annan plats.

Handlingsalternativ för utökad lagringskapacitet vid en eventuell försening vid driftsättningen av Kärnbränsleförvaret och Clink beskrivs i avsnitt 3.7.5.

Använt kärnbränsle



Figur 3-5. Aktivitets- och milstolpeplan för etablering av Kärnbränsleförvaret och Clink utifrån aktuellt läge i tillståndsärendet KBS-3. Teknikutveckling som behövs till angivna milstolpar redovisas i del II.

3.3.3 Inkapsling

Anpassat till tillståndsprövningens fortskridande, kommer systemkonstruktion att pågå och vars resultat kommer att ligga till grund för arbetet under uppförandeskedet. Det pågår planering för de handlingar som ska utgöra underlag för ansökan om uppförande som tillsänds SSM.

Uppförande

Uppförandet av inkapslingsdelen får tidigast börja efter att SSM har godkänt PSAR för Clink. Uppförandet inbegriper, förutom själva byggnationen av inkapslingsdelen, även verifiering och validering av installerade system samt nödvändig kvalificering av dugligheten i vissa produktions- och mät-system för inkapsling. Uppförandet av inkapslingsdelen kommer även omfatta anläggningsändringar i Clab. Den huvudsakliga säkerhetsfrågan under uppförande av inkapslingsdelen är, att säkerheten

i Clab med avseende på anläggning och verksamhet, kan upprätthållas. Under uppförandeskedet kommer driftpersonalen utbildas och styrande dokument att tas fram inför genomförandet av provdrift.

Driften av Clab fortgår under hela uppförandet av inkapslingsdelen, men mottagning av använt kärnbränsle kan under vissa tider behöva begränsas.

Driftsättning och drift

Driftsättningen av anläggningens delsystem sker successivt, i takt med att systemen byggs klart och installeras. Inför provdriften upprättas säkerhetstekniska driftförutsättningar (STF) och andra dokument med instruktioner och styrning av driften. Efter att anläggningens olika funktioner och organisation har testats och godkänts i ett inaktivt samfunktionsprov och SSM har godkänt en förnyad SAR kan provdriften inledas.

När provdrift genomförts och utvärderats upprättas en ansökan till SSM om att få ta anläggningen i rutinmässig drift. Till den bifogas en kompletterad SAR baserad på de erfarenheter som inhämtats och åtgärder som har vidtagits under provdriften. SAR ska efter driftsättning löpande förvaltas och hållas aktuell i enlighet med SSM:s föreskrifter.

Driften av Clink omfattar både dagens verksamhet i Clab och inkapslingsdelens olika processer såsom urval av använt kärnbränsle för inkapsling, kontroller och inkapsling av använt kärnbränsle samt kontroll av kapslar.

Produktionssystem för kapslar

Förnyade analyser och planering av produktionssystemet för kapslar kommer att genomföras under Fud-perioden för att fastställa omfattning och tidsplan för etablerandet av produktionssystemet.

Den teknikutveckling som pågår och planeras, förutom optimering och design av kapselkomponenter, avser främst processer för att styra och kontrollera kvaliteten på tillverkning av komponenter till kapseln, svetsning av kopparbotten och förslutning av locket samt utveckling av kontroll och provning av komponenter och svetsar. Detta redovisas i kapitel 8.

3.3.4 Slutförvaring

Tillståndsprövning och projektering

Anpassat till tillståndsprövningarnas framskridande görs de förberedelser som krävs för att kunna påbörja uppförandet av Kärnbränsleförvarets tillfarter så snart som möjligt efter att alla domar och villkor erhållits. Uppförandeskedet kommer att medföra nya förutsättningar för SKB:s organisation och verksamhet. Det gäller exempelvis styrning av projektet baserat på insamlad information från detaljundersökningsprogrammet och eventuellt tillkommande markundersökningar. Projektorganisationen kommer successivt att bemannas efter de arbetsuppgifter som blir aktuella att introducera i projektet.

Parallellt med tillståndsprövningarna, fortsätter projekteringen av anläggningen. Bland annat genomförs byggtekniska förberedelser och geologiska undersökningar. Vidare genomförs markundersökningar för att få underlag för placering av byggnader och dimensionering av grundläggning. Berget kommer att undersökas, främst vid tillfarternas planerade lägen. Den lokala infrastrukturen i Forsmark kommer att förberedas. Det handlar i stor utsträckning om att i samarbete med Forsmarks Kraftgrupp AB, anpassa den infrastruktur som redan finns i Forsmark så att även behov för Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR kan tillgodoses.

Under pågående tillståndsprövningar sker även arbeten avseende Kärnbränsleförvarets påverkan på den yttre miljön. SKB har ansökt om artskyddsdispens hos Länsstyrelsen i Uppsala län. Den av länsstyrelsen beviljade dispensen har överklagats och ärendet ligger nu hos MMD. Miljötillstånd och villkor enligt MB kommer att meddelas efter att huvudförhandling hållits i MMD.

Detaljprojekteringen genomförs successivt i takt med att anläggningen byggs ut och med hänsyn till resultat från teknikutvecklingen. Resultat från projekteringen behövs som underlag för bland annat fördjupad planering, upphandlingar och byggarbeten. Under pågående tillståndsprövningar detalj-

projekteras därför i första hand anläggningsdelar som ska byggas tidigt. Det är framför allt etableringsytor, platskontor, tillfarter till förvaret – det vill säga ramp, schakt och centralområde – samt delar av anläggningen ovan mark. När anläggningen tagits i drift fortsätter en successiv utbyggnad av förvarsområdet.

Uppförande

Uppförandeskedet börjar efter att PSAR inför uppförande har lämnats in och godkänts av SSM.

Inledningsvis görs utfyllnader av delar av driftområdet, hanteringsytor iordningställs och byggprovisorier etableras. Ovan- och undermarksanläggningarna byggs ut parallellt.

Uppförandet av undermarksanläggningarna delas in i tre delar. I den första drivs tillfarter (schakt och ramp) ner till förvarsnivån. Den andra är när centralområdets bergutrymmen byggs och tekniska system installeras och den tredje när det första deponeringsområdet etableras och anläggningen tas i drift och provas. Uppförandet av tillfarterna är tidskritiskt för hela projektets framdrift. När förvarsnivån nåtts, startar uppförandet av centralområdet. Bergarbetena för tillfarter och centralområde åtföljs av montagearbeten för den utrustning som behövs för driften. Anläggningarna ovan mark byggs i en takt som anpassas till arbetena under mark.

Drivningen av tillfarterna och centralområdet ger fördjupade kunskaper om bergförhållandena, som kommer att omsättas i exempelvis insatser av bergförstärkning och tätning i tunnlar eller modifiering av förvarsutformningen. Informationen kommer även användas för att underbygga en förnyad SAR inför provdrift.

Den viktiga och utmanande platsanpassningen av förvaret görs inför utbyggnaden av centralområdet, som sker parallellt med undersökningar för det första deponeringsområdet till vilket en tunnel drivs för tillträde. Från denna tunnel drivs sedan några deponeringstunnlar där deponeringshål borras. Syftet med att färdigställa ett deponeringsområde i detta tidiga skede är dels att använda en del av området för produktionslinjetester och samfunktionsprovning, dels att samla de geovetenskapliga data som behövs för att underbygga en förnyad SAR inför provdrift.

Den teknikutveckling som behövs för att färdigställa systemet för deponering omfattar buffert, återfyllning, plugg samt metodik och maskiner för installationer, redovisas i kapitel 10.

Driftsättning och drift

Liksom för Clink genomförs ett samfunktionsprov för slutförvarsanläggningen där alla moment i verksamheten genomförs, inklusive deponering av ett antal kapslar utan innehåll av använt kärnbränsle, för att testa funktioner och organisation. Deponeringen sker i det första deponeringsområdet som byggts under senare delen av uppförandeskedet. Därefter, när SSM har godkänt en förnyad SAR, kan provdriften med fyllda kapslar inledas. Inför provdriften upprättas STF och andra dokument med instruktioner och styrning av driften.

Innan en anläggning får tas i rutinmässig drift ska SAR kompletteras med beaktande av erfarenheter från provdriften och godkännas av SSM. SAR, ska efter att anläggningen tagits i drift, löpande förvaltas och hållas aktuell i enlighet med SSM:s föreskrifter.

Drift av slutförvaret omfattar dels successivt uppförande och färdigställande av platsanpassade deponeringstunnlar med deponeringshål och dels installation av buffert, transport och deponering av kapslar, återfyllning och pluggning av deponeringstunnlar. Driftsättningen av slutförvarets delsystem sker successivt, i takt med att systemen byggs klart och installeras.

3.4 Planeringen för mycket lågaktivt avfall

Idag finns de anläggningar som behövs för hantering av mycket lågaktivt avfall, men vid avvecklingen av kärnkraftsreaktorer kommer volymerna avfall som ska hanteras att öka väsentligt. Avvecklingarna har aktualiserat frågan om hantering av de större volymerna som kommer att genereras.

Avfallsprognoserna för mycket lågaktivt rivningsavfall innehåller osäkerheter och en översyn, av både uppskattade totalmängder och fördelning mellan olika avfallskategorier, kommer att genomföras. Internationella erfarenheter visar att det kan uppstå större mängder mycket lågaktivt avfall och material som behöver friklassas än beräknat.

För att hantera de stora volymerna mycket lågaktivt avfall som produceras vid nedmontering och rivning av kärnkraftsreaktorerna ser reaktorinnehavarna ett behov av markförvar.

Det pågår ständigt ett förbättringsarbete i syfte att minska avfallsvolymer, genom bland annat bättre källsortering, effektivare sortering av insamlat material, av- och omemballering av inkommande gods, friklassning och zonindelning av arbetsområden under revisioner.

Se avsnitt 2.1.1 idrifttagna samt planerade markförvar för lågaktivt avfall.

3.5 Genomförandeplan för avveckling av kärntekniska anläggningar

Planeringen för avveckling av kärnkraftverken i Barsebäck, Forsmark, Oskarshamn och Ringhals, Ågestareaktorn samt för SKB:s kärntekniska anläggningar redovisas i del III. Där beskrivs hur arbetet fördelats mellan reaktorinnehavarna och SKB, samt inom de två koncernerna Vattenfall AB (huvudägare till Ringhals AB och Forsmarks Kraftgrupp AB) och Uniper (legalt namn Sydkraft Nuclear Power, huvudägare till OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB). Vidare redovisas det utvecklingsarbete som kvarstår för att möjliggöra avvecklingen av de berörda anläggningarna.

Fud-program 2022 utgör tillsammans med respektive tillståndshavares avvecklingsplan(er) och industrins gemensamma kostnadsberäkning i planrapporten, tre samverkande, kravställda toppdokument som redovisar den avveckling som planeras av de svenska kärnkraftverken och övriga befintliga eller planerade kärntekniska anläggningar, till exempel Clink och SKB:s slutförvar. De tre toppdokumenten kompletterar varandra till sitt innehåll, där Fud-programmet redovisar den utvecklingsverksamhet och övriga åtgärder som behövs för att på ett säkert sätt kunna avveckla kärnkraftverken. Avvecklingsplanerna redovisar det tänkta genomförandet med fokus på strålsäkerhet samt strategiska aspekter. Planrapporten redovisar den beräknade kostnaden för avvecklingen så som den beskrivs i Fud-programmet och avvecklingsplanerna.

3.5.1 Översikt avveckling

Avveckling av en reaktorläggning för att uppnå en friklassad anläggning, omfattar ett flertal aktiviteter. Inför avveckling måste erforderliga tillstånd finnas. När en reaktor tas ur drift vidtar avställningsdrift, då transporteras allt använt kärnbränsle bort från reaktorn till mellanlagring. Vid behov vidtar därefter servicedrift fram till att nedmontering och rivning påbörjas.

Reaktorinnehavarnas planering är att starta nedmontering och rivning så snart som möjligt efter slutlig avställning. När anläggningen/anläggningsdelarna friklassats kan konventionell rivning och återställning av mark genomföras.

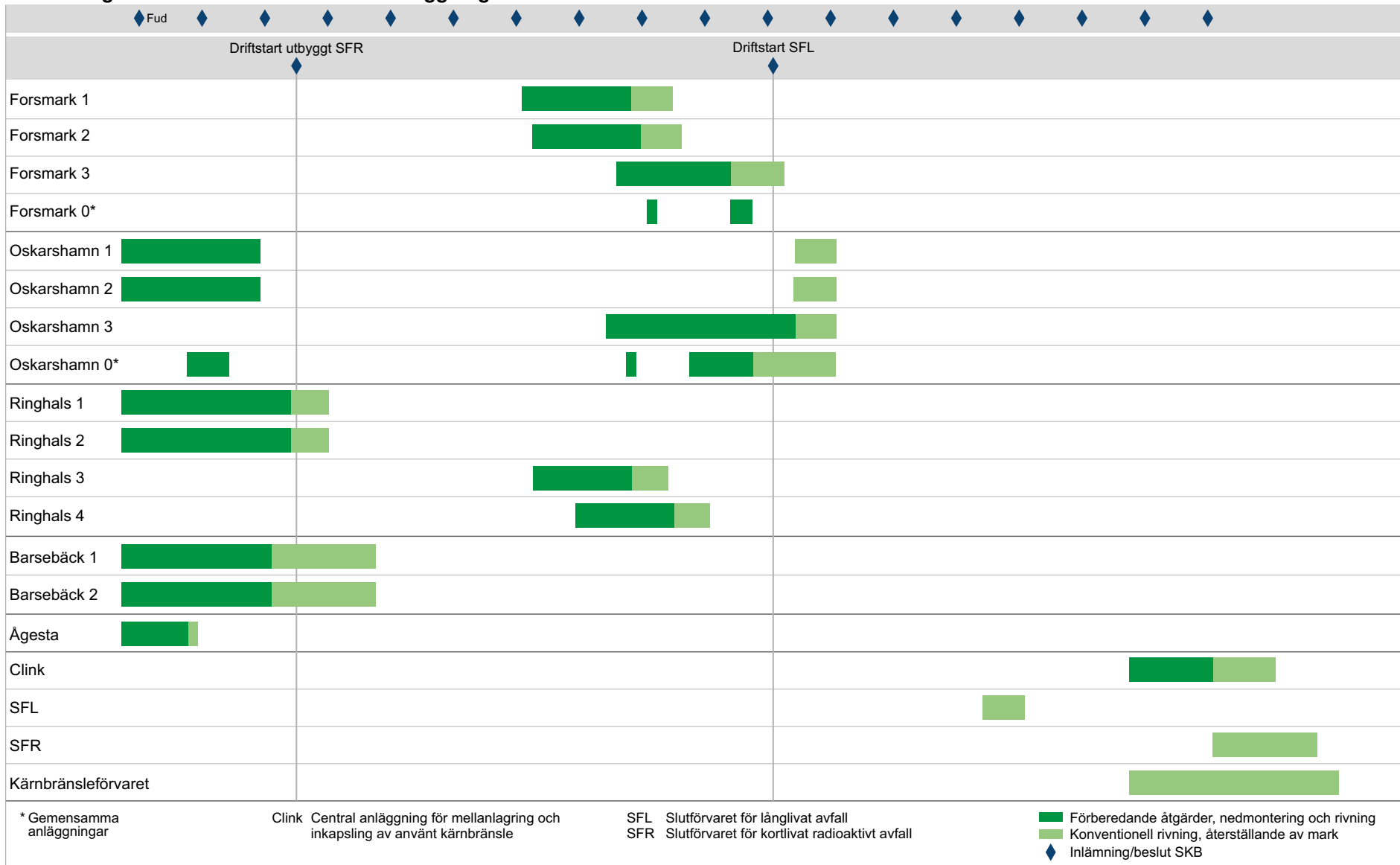
3.5.2 Nuläge och övergripande planering

Figur 3-6 visar den övergripande aktivitets- och milstolpeplanen för avveckling av samtliga kärnkraftverk och SKB:s anläggningar.

Barsebäck Kraft AB

Erforderliga tillstånd har erhållits för nedmontering, rivning och förberedande åtgärder som krävs för att påbörja arbetet är genomförda. Nedmontering och rivning pågår på kärnkraftverket. Friklassning av hela siten planeras påbörjas i slutet av 2020-talet och vara klar en bit in på 2030-talet.

Avveckling av kärnkraftverk och SKB:s anläggningar



Figur 3-6. Aktivitets- och milstolpeplan för avveckling av samtliga kärnkraftverk och SKB:s anläggningar.

OKG Aktiebolag

Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2 befinner sig under nedmontering och rivning. Gemensamma anläggningar som inte krävs för drift eller avveckling av Oskarshamn 3 kommer att rivnas parallellt med rivningen av Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2. Övriga gemensamma anläggningar nedmonteras och rivs efter genomförd avveckling av Oskarshamn 3 alternativt lämnas kvar till annan aktör. Oskarshamn 3 planeras vara i drift till mitten av 2040-talet.

Ringhals AB

Ringhals 1 och Ringhals 2 är bränslefria och planering och förberedelser pågår för att påbörja nedmontering och rivning, vilken beräknas vara slutförd under början av 2030-talet. Ringhals 3 och Ringhals 4 planeras vara i drift fram till 2041 respektive 2043.

Forsmarks Kraftgrupp AB

Forsmarks Kraftgrupp AB:s samtliga reaktorer planeras vara i drift i 60 år, vilket innebär till 2040, 2041 respektive 2045 för Forsmark 1, Forsmark 2 respektive Forsmark 3.

Ågestaanläggningen

Kärnkraftverket i Ågesta har befunnit sig i servicedrift sedan 1974. Under sommaren 2020 inleddes avvecklingen, vilken planeras vara genomförd i mitten av 2020-talet.

SKB:s anläggningar

Avvecklingen av Clink och Kärnbränsleförvaret kan inledas tidigast när allt använt kärnbränsle har deponerats och avvecklingen av SFR kan inledas tidigast när avfallet från avvecklingen av Clink har deponerats. SFL däremot kan avvecklas då det långlivade avfallet från den sista reaktorn tagits om hand. Stängningen av SFL förutsätter att rivningsavfallet från Clink inte innehåller något långlivat avfall samt att allt långlivat avfall som AB SVAFO hanterar är omhändertaget.

3.6 Genomförandeplan för transporter

Samtliga transporter sker sjövägen, utom från Forsmark till SFR och från Oskarshamn till Clab, som sker landvägen. Eftersom det inte finns något plats utpekad för SFL, är det oklart vilka transporter dit som eventuellt kommer att ske landvägen.

3.6.1 Övergripande planering

Beläggningen på transportsystemet kommer att öka från och med 2030-talet och de efterföljande decennierna. Antalet transporter kommer att vara jämt fördelad mellan radioaktivt avfall och inkapslat använt kärnbränsle. De transporter som tillkommer, jämfört med idag, är i huvudsak av inkapslat använt kärnbränsle som regelbundet ska transporteras från Clink till Kärnbränsleförvaret samt rivningsavfall från avvecklade kärnkraftverk till SFR och, med början under 2050-talet, även till SFL. Ett ökat behov av att transportera driftavfall till SFR kommer även att föreligga till följd av hävningen av det deponeringsstopp som kommer råda under tiden för utbyggnationen av anläggningen. När de sista reaktorerna har avvecklats minskar beläggningen och antalet transporter domineras då av inkapslat använt kärnbränsle till Kärnbränsleförvaret.

Fartygets kapacitet, inklusive övriga komponenter i transportsystemet, bedöms inte bli gränssättande för genomförandet av kärnavfallsprogrammet, se avsnitt 2.3. I dagens transportsystem finns överkapacitet och systemet förutses klara den ökade transportvolymen.

3.6.2 Transport av låg- och medelaktivt avfall

Styrstavar till mellanlager

Transporter med långlivat avfall i form av styrstavar från BWR till mellanlager, kommer fortsätta så länge som det finns BWR i drift. Vid transporten används en transportbehållare avsedd för hårdkomponenter.

Kortlivat drift- och rivningsavfall till SFR

Kortlivat låg- och medelaktivt avfall transporteras från kärnkraftverken, Clab och Studsvik till SFR för deponering. Lågaktivt avfall transporteras i ISO-containrar, medan medelaktivt avfall transporteras i avfallstransportbehållare. Transporterna kommer att ske i kampanjer.

Långlivat drift- och rivningsavfall till SFL

Innan SFL tas i drift antas det tillkomma transporter av långlivat avfall från Barsebäcks kärnkraftverk till mellanlagring på annan plats. Under SFL:s drifttid kommer både det avfall som finns i mellanlager och det avfall som produceras under drifttiden att transporteras dit.

Transportsystemet kommer att kompletteras med en ny typ av transportbehållare för långlivat medelaktivt avfall placerat i ståltank.

3.6.3 Transport av använt kärnbränsle

Använt kärnbränsle från kärnkraftverken till Clab/Clink

Dagens transporter med använt kärnbränsle från kärnkraftverken till Clab kommer fortsätta på motsvarande sätt till Clink så länge det finns reaktorer i drift.

Inkapslat använt kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret

När KBS-3-systemet tas i drift kommer kopparkapslar med använt kärnbränsle att transporteras från Clink till Kärnbränsleförvaret.

Transportsystemet kommer att kompletteras med en ny typ av transportbehållare (KTB) för transport av kapslar med använt kärnbränsle från Clink till Kärnbränsleförvaret. Planen är att transporterna sker i en jämn ström, fyllda KTB:er till Kärnbränsleförvaret och tomma till Clink.

Utformningen av KTB:n görs i en iterativ process med leverantören för att uppfylla myndigheternas krav samt SKB:s egna förutsättningar, specifika krav och önskemål. Behållarens konstruktion och säkerhetstekniska egenskaper redovisas i en säkerhetsrapport som utgör underlag för licensiering av den av behörig myndighet i det land den tillverkas. Innan behållaren får användas i Sverige ska en validering av licensen göras av SSM. Tidsåtgång för konstruktion och licensiering skattas till minst sju år.

Första KTB:n ska levereras till Clink och Kärnbränsleförvaret inför provningen av enskilda system. De inledande systemvisa testerna planeras genomföras ett år innan samfunktionsprovningen av respektive anläggning. Resterande behållare som behövs för att nå full deponeringskapacitet, planeras att tillverkas och levereras successivt därefter.

3.6.4 Specialtransporter

Erfarenheterna från transporterna av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall med SKB:s fartyg ger förutsättningar vad gäller bemanning med kompetens, för att utföra externa transporter av annat radioaktivt gods. De erfarenheten som erhålls då, ökar i sin tur kompetensen att utföra specialtransporter som kan behövas i samband med avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna.

Behovet av specialtransport av udda komponenter som eventuellt uppkommer i samband med avvecklingen av kärnkraftverken, har ännu inte studerats. I och med beslutet att segmentera BWR-tankarna, i stället för att deponera dem hela, har transportlogistiken förenklats. Det handlar därför rimligen bara om ett fåtal stora rivningskomponenter som kan komma att kräva specialtransport.

3.7 Handlingsalternativ vid förändrade förutsättningar

SKB:s och reaktornnehavarnas planering för omhändertagande av avfallet baseras på de förutsättningar och antaganden som gäller för kärnkrafts- och kärnavfallsprogrammen idag. Det finns olika slag av osäkerheter i förutsättningarna för planeringen, men verksamheten medger en förhållandevis stor flexibilitet. I detta avsnitt redovisas ett antal möjliga förändringar av förutsättningar och tänkbara konsekvenser.

Förutom påverkan på avfallssystemet av förändring av de planerade drifttiderna för återstående reaktorer, kan tidpunkter för omhändertagande av avfall påverkas av framdriften i pågående tillståndsprövningarna.

3.7.1 Kärnkraftsreaktorernas drifttider

Sedan Fud-program 2019 har reaktorerna Ringhals 1 och Ringhals 2 ställts av. För resterande sex reaktorer¹ är den planerade drifttiden, liksom i Fud-program 2019, 60 år. Det innebär att dessa reaktorer är tänkta att ställs av under perioden 2040 till 2045.

Förlängning av de planerade drifttiderna

SKB:s anläggningar inom KBS-3-systemet dimensioneras för att hantera och deponera 6 000 kapslar med använt kärnbränsle. Kärnkraftsföretagens aktuella prognoser, med hänsyn tagen till genomförda förtida avställningarna, visar på cirka 5 600 kapslar. Detta ger en marginal för eventuella förlängda drifttider för återstående reaktorerna. Exempelvis kommer det dimensionerande kapselantalet för Kärnbränsleförvaret om 6 000 kapslar nås om reaktorernas drifttid förlängs med cirka sex år, det vill säga till en total drifttid på cirka 66 år. Skulle reaktorernas drifttid förlängas, ytterligare bedöms kapaciteten i Kärnbränsleförvaret kunna ökas och drifttiden förlängas, efter vederbörlig tillståndsprövning, genom att utnyttjade områden på det valda förvarsdjupet tas i anspråk.

Behovet av mellanlagringskapacitet i Clab för använt kärnbränsle påverkas inte av en förlängning av reaktorernas drift, då det tillkommande använda kärnbränslet uppkommer under 2040-talet. Enligt planerna pågår då deponering i Kärnbränsleförvaret och därmed frigörs kapacitet i förvaringsbassängerna. Vid en försening med mer än tio år för driftsättningen av Clink och Kärnbränsleförvaret, blir det nödvändigt att utöka mellanlagringskapaciteten för det använda kärnbränslet. Det gäller även efter att utrymme har frigjorts i Clab, se avsnitt 3.3.2.

Dimensioneringen av SFR:s utbyggnad bedöms ge tillräcklig marginal för tillkommande driftavfall vid förlängda drifttider. Den baseras på de tidigare planerade drifttiderna för reaktorerna inklusive ett osäkerhetspåslag. Mängden driftavfall som deponeras i markförvar kommer sannolikt att öka vid förlängda drifttider. Det rör sig dock om en mindre del av den totala avfallsmängden. Mängden rivningsavfall bedöms inte påverkas av förlängda drifttider.

Vid förlängda drifttider kommer även det långlivade avfallet i form av BWR-styrstavar och övriga hårdkomponenter att öka. Vid behov finns det möjlighet att anpassa den slutliga förvarsvolymen i SFL fram till byggstart, det vill säga fram till 2040-talet med dagens planering.

Förkortning av de planerade drifttiderna

Omvänt skulle en förkortning av de planerade drifttiderna innebära en minskad mängd använt kärnbränsle och driftavfall och därför leda till ett minskat utrymmesbehov i slutförvaren. Alla befintliga och planerade anläggningar för omhändertagande av kärnavfall och använt kärnbränsle kommer ändå att behövas. Eftersom Kärnbränsleförvaret byggs ut successivt under driften, kan deponeringsområdenas storlek anpassas utifrån det verkliga behovet. I detta fall kommer antalet deponeringspositioner att minska. Om SFR redan har byggts ut i full omfattning enligt dagens prognostiserade volymer, kommer en förkortad drifttid av reaktorerna sannolikt innebära att anläggningen inte kommer att utnyttjas fullt ut.

I det fallet att ytterligare reaktorer ställs av i förtid, kommer sannolikt den totala mängden använt kärnbränsle understiga den tillståndgivna mängden för mellanlagring i Clab på 11 000 ton.

Enligt dagens prognoser nås den idag tillståndgivna mängden använt kärnbränsle, 8 000 ton under 2024. Om medgivande till utökad mellanlagring inte erhållits vid denna tidpunkt, kommer det använda kärnbränslet att behöva mellanlagras i bassängerna på kraftverken fram tills att tillstånd erhålls. Om ytterligare reaktorer skulle stängas av i förtid av de som är i drift skulle deras sluthärdar på samma sätt behöva mellanlagras i bassängerna på kraftverken i väntan på att kunna mellanlagras i Clab. Mellanlagring av använt kärnbränsle på kraftverken efter slutlig avställning är inte ett önskvärt scenario, då samma säkerhetsnivå inte kan uppnås som i Clab samt att det innebär ökade kostnader.

¹ Forsmark 1, Forsmark 2 och Forsmark 3, Oskarshamn 3 samt Ringhals 3 och Ringhals 4.

Förkortade drifttider av reaktorerna, speciellt om reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3 (som är tänkta att drivas längst) stänger tidigare än planerat, skulle troligen innebära en tidigareläggning även av avvecklingen av berörda reaktorer. Det skulle också kunna medföra att det totala kärnavfallsprogrammet kan avslutas tidigare. Hur mycket tidigare beror naturligtvis på hur många reaktorer som skulle beröras och hur mycket drifttiderna förkortas. Om den sista reaktorn rivs innan SFL har tagits i drift, behöver det långlivade rivningsavfall i likhet med övriga reaktorer avfall mellanlagras tills SFL är driftsatt.

3.7.2 Driftsättning av utbyggt SFR

SKB planerar att ta det utbyggda SFR i provdrift under början av 2030-talet. Enligt planeringen kommer avvecklingen av de sju första reaktorerna (medräknat Ågestareaktorn) påbörjas innan SFR-utbyggnaden står klar. Det innebär att olika mellanlager för det kort- och långlivade rivningsavfallet behövs, se avsnitt 3.2.2 och 3.2.3.

Senareläggning

Barsebäck Kraft AB planerar för att anläggningen ska kunna friklassas så snart som möjligt efter att allt radioaktivt avfall transporterats till SFR för deponering (kortlivat avfall) eller mellanlagring på annan plats (långlivat avfall). En försening av SFR-utbyggnaden innebär därmed även en försening av friklassningen av Barsebäckens anläggningsområde, om inte det kortlivade avfallet också transporteras till annan plats för mellanlagring.

För OKG Aktiebolag och Ringhals AB är beroendet av en försening i utbyggnaden av SFR inte lika starkt, eftersom det finns kvarvarande reaktorer i drift på anläggningsplatserna. Mellanlagringskapaciteten på kraftverksområdena bedöms kunna utökas och klara behoven vid en försening av utbyggnaden med ett par år.

Tidigareläggning

En tidigareläggning av SFR-utbyggnadens driftsättning innebär ett förkortat och minskat behov av mellanlagring av det kortlivade rivningsavfallet. För Barsebäck Kraft AB medför det att transporter kan tidigareläggas och möjligheter att anläggningen blir friklassad som helhet före planerad tid.

3.7.3 Slutförvaring av mycket lågaktivt rivningsavfall

I och med att aktivitetsnivån i det mycket lågaktiva avfallet överskrider friklassningsnivåer är de alternativ för omhändertagande som idag existerar deponering i markförvar eller i bergssal för lågaktivt avfall (BLA) i SFR. BLA är en strålsäkerhetsmässigt betydligt mer avancerad anläggning än ett markförvar och avfall som deponeras i BLA ska företrädesvis ha ett högre aktivitetsinnehåll än det mycket lågaktiva avfallet, för att motivera såväl kostnader som miljöpåverkan (i form av exempelvis bergguttar och transporter).

Utbyggnaden av SFR är dimensionerad för att slutförvara allt lågaktivt avfall från nedmontering och rivning av reaktorerna, inklusive mindre mängder av det mycket lågaktiva avfallet. Avfallsprognoserna är i nuläget översiktliga men avfallsproducenterna avser att uppdatera och förfina dessa. Den nuvarande inriktningen för slutligt omhändertagande av mycket lågaktivt avfall är markförvar. Den baseras på utredningar gjorda av avfallsproducenterna där flera avbördningsalternativ har utvärderats.

Rent tekniskt kan det mycket lågaktiva avfallet deponeras i BLA i samma form som i ett markförvar. För att maximera nyttjandet av förvarsutrymmet är dock någon form av extra behandling att föredra. Det kan antingen vara att aktiviteten flyttas till annat bärarmaterial (genom dekontaminering) eller genom att ändra form på det ursprungliga avfallet (genom exempelvis förbränning). Det är främst metaller i det mycket lågaktiva avfallet som kan dekontamineras för att därefter friklassas. Rester från dekontamineringen konditioneras för slutförvaring. Mjuka och inerta fraktioner, såsom isoleringsmaterial, är vanligen tekniskt mycket svåra att dekontaminera, alternativt svåra att friklassa efter dekontaminering.

För vissa delmängder av avfallet som är brännbara kan kontrollerad förbränning vara en alternativ metod för koncentrerat av radioaktivitetsinnehållet.

3.7.4 Lokalisering av plats för och driftsättning av SFL

SKB planerar att ta SFL i drift under 2050-talet, vilket är fem till tio år efter att de sista reaktorerna, ställs av, se avsnitt 3.2.3. Tidsplanen baseras på ett scenario där SFL lokaliseras till en plats som SKB har kännedom om genom tidigare platsundersökningsprogram.

Platsen för SFL är inte beslutad. Skulle SFL uppföras på en plats där SKB har begränsade kunskaper om geologin från tidigare undersökningsprogram, kan driftsättningen komma att skjutas framåt i tiden. En sådan lokalisering kräver ett mer omfattande arbete, dels för att identifiera en plats, dels för att det medför mer omfattande platsundersökningar. En försening i driftsättningen skulle innebära en förlängd mellanlagring av det långlivade avfallet, både vid kraftverken och i Studsvik. Detta skulle i sin tur kunna påverka kärnkraftsföretagens och AB SVAFO:s möjligheter att utveckla den kärntekniska verksamheten på sina områden.

Det finns också osäkerheter i den gällande planeringen beroende av att SFL ligger relativt tidigt i utvecklingen. En försening som resulterar i något eller några års försening i processen fram till driftsättning av förvaret går inte att utesluta.

En eventuell tidigareläggning av SFL:s driftsättning bedöms inte ge några negativa konsekvenser för avfallssystemet. Det skulle innebära en kortare tids mellanlagring av det långlivade avfallet.

Ett möjligt alternativ är också att placeringen av slutförvaret av det långlivade avfallet fördelas till två olika platser. Enligt planerna består SFL av två olika förvarsdelar med olika barriärlösningar, som rent principiellt skulle kunna lokaliseras till olika platser. Konsekvenserna av en sådan lösning på driftsättningstiderna beror, liksom i fallet med ett sammanhållet SFL, till stor del av valet av plats och omfattningen av de därtill hörande platsundersökningarna.

3.7.5 Driftsättning av Kärnbränsleförvaret och Clink

Enligt planerna inleds provdrift av Kärnbränsleförvaret och Clink andra hälften av 2030-talet, vilket innebär att SKB då påbörjar utlastningen av det använda kärnbränslet från Clabs förvaringsbassänger. För att Clab ska kunna ta emot det använda kärnbränsle som produceras fram till denna tidpunkt planerar SKB att utöka den tillståndsgivna mängden använt kärnbränsle för mellanlagring till 11 000 ton och frigöra lagringspositioner i bassängerna, se avsnitt 3.3.2. Lagringsutrymmet beräknas då räcka fram tills att Kärnbränsleförvaret och Clink har driftsatts.

Senareläggning

Vid en senareläggning av KBS-3 systemets driftstart till mitten av 2040-talet kommer sluthärdarna för Forsmark 3 och Oskarshamn 3 inte rymmas i Clab, utan behöva lagras i bassängerna på kraftverken. Förutsättningarna för att kunna lagra övrigt producerat använt kärnbränsle i Clab är att hårdkomponenter utlastats till lokala mellanlager, se avsnitt 3.3.2.

Om det skulle visa sig nödvändigt finns även möjligheten att bygga ut mellanlagringskapaciteten för det använda kärnbränslet. Det finns två lagringsmetoder, våt respektive torr lagring. Våt lagring är det som används i Clab. Inför ett beslut om en eventuell utökning, kommer möjligheten till torr mellanlagring av använt kärnbränsle att utredas. Då måste bland annat aspekter avseende bränslets egenskaper efter torr mellanlagring och eventuell påverkan av det på säkerheten efter förslutning analyseras. Torr mellanlagring används idag av ett flertal länder, bland annat Spanien, Tyskland och USA.

Tidigareläggning

SKB bedömer möjligheterna att ta Clink och Kärnbränsleförvaret i drift väsentligt tidigare än planerat som små. En eventuell tidigareläggning bedöms inte ge några negativa konsekvenser för avfallsprogrammet.

4 Fortsatt forskning och utveckling

I detta kapitel redovisas en översikt av de forsknings- och utvecklingsbehov som identifierats för att genomföra de återstående delarna av kärnavfallsprogrammet. Samma stegvisa process avseende ansökningar och prövningar enligt KTL gäller för alla slutförvaren och Clink, även om omfattningen och komplexiteten varierar. Regeringsbesluten avseende KBS-3-systemet och utbyggnaden av SFR är viktiga milstolpar, men innebär inte att SKB:s forskning och teknikutveckling avslutas.

För KBS-3-systemet genomförs fortsatt forskning för att utveckla och stärka analyserna inför kommande steg i den stegvisa prövningen enligt KTL. Forskning och teknikutveckling genomförs också för att minska osäkerheter i analyserna, vilket ger marginaler för att genomföra optimering av slutförvarsanläggningen och dess tekniska barriärer.

De erfarenheter som erhållits från driften av befintligt SFR kommer att appliceras på arbetet med att identifiera processer i avfallet, förändrade prognoser för inventarier, liksom att identifiera kommande behov av nya eller vidareutvecklade avfallsbehållare och avfallstransportbehållare. Metodutveckling sker löpande för att förfinas bestämningen av inventarier i låg- och medelaktivt avfall.

För SFL kvarstår frågor som behöver hanteras innan ansökningarna om tillåtlighet och tillstånd kan skickas in enligt MB respektive KTL. En stor del av den forskning och teknikutveckling som har genomförts och som planeras, särskilt för SFR, kommer kunna användas även för SFL.

De specifika insatserna som krävs för att genomföra planen för omhändertagandet av det mycket lågaktiva kärnavfallet bedöms vara begränsade.

Grunderna för planeringen av de kommande forsknings- och teknikutvecklingsinsatserna beskrivs i avsnitt 4.1. Där ges en översikt av hur långt forskningen och teknikutvecklingen ska ha nått vid de milstolpar som är relevanta för Clink och respektive slutförvar.

I avsnitten 4.2 till 4.9 motiveras och sammanfattas den forskning och teknikutveckling som SKB kommer att prioritera under Fud-perioden. Nuläge och program för specifika aktiviteter under Fud-perioden presenteras i del II.

De avslutande arbeten som planeras att göras i Äspölaboratoriet innan berganläggningen stängs, presenteras i avsnitt 4.10. Hur Kärnbränsleförvaret planeras att övervakas under uppförande och drift beskrivs i avsnitt 4.11.

En översikt av teknikutvecklingsbehoven utifrån utveckling av kärntekniska anläggningar återfinns i avsnitt 4.12 och i avsnitt 4.13 ges en beskrivning av andra områden som är relevanta för SKB:s uppdrag.

4.1 Planerade insatser för respektive slutförvar och Clink

SKB:s och reaktorinnehavarnas planering av forsknings- och utvecklingsinsatser för slutförvaren och Clink utgår från handlingsplanen där den stegvisa beslutsprocessen, som redovisats i avsnitt 1.1.5, utgör utgångspunkt för viktiga milstolpar. De milstolpar som är kopplade till beslutsstegen i form av ansökningar och säkerhetsredovisningar, styr när kunskap och utveckling av teknik behöver ha nått en viss nivå och när SKB kan påbörja uppförande respektive drift av anläggningar, se avsnitt 3.1.

En del av de praktiska förberedelserna inför byggstart är planeringen inför kommande entreprenadupphandling och att forma en organisationsstruktur som har förutsättningar för erfarenhetsåterföring mellan de olika slutförvaren under uppförandet. Framtagande av undersökningsprogram med tillhörande metodbeskrivningar för undersökningar för respektive slutförvar är också viktiga förberedelser.

För SFL genomfördes en säkerhetsvärdering 2019 (SKB TR-19-01) för det föreslagna förvarskonceptet. Utfallet av säkerhetsvärderingen utgör utgångspunkt för fortsatta forsknings- och teknikutvecklingsinsatser. Den ger också underlag för att precisera platsvalskriterier och för att utforma och genomföra arbetet med att lokalisera en plats för slutförvaret, se avsnitt 4.1.2.

Ovan beskrivna redovisningar och studier, tillsammans med de synpunkter som lämnats av SSM i samband med prövningen av ansökningarna och granskningar av tidigare Fud-program samt regeringens beslut som pekar på behov av redovisning inom den stegvisa prövningen och kommande Fud-program, ligger till grund för denna redovisning av programmet för forsknings- och utvecklingsinsatser. Det delas in i tre grupper:

- Ökad **processförståelse**, det vill säga den vetenskapliga förståelsen för de processer som påverkar slutförvaren och dess barriärer och därmed grunden för att bedöma deras betydelse för säkerheten efter förslutning. Arbetet utförs enligt den styrning av och strategi för forskning som beskrivs i avsnitt 5.2.
- Kunskap och kompetens kring **utformning, konstruktion, tillverkning och installation** av de barriärer och komponenter som ska användas i anläggningarna. Arbetet utförs enligt den teknikutvecklingsprocess som beskrivs i avsnitt 5.3.
- Kunskap och kompetens kring **kontroll och provning** för att verifiera att systemets barriärer och komponenter produceras och installeras enligt godkända specifikationer och därmed uppfyller kraven. Här ingår även utveckling av metoder och instrument för kontroll och provning samt övervakning av slutförvaren och förvarsplatserna.

Ett led i utvecklingsarbetet är att demonstrera hur framtagna lösningar fungerar i praktiken. Efter att pågående försök vid Äspölaboratoriet har avslutats, se avsnitt 4.10, kommer demonstrationsförsök genomföras i anslutning till uppförandet av de planerade slutförvaren, som en del i provningen och verifieringen av tänkta lösningar.

För Kärnbränsleförvaret övervägs övervakade långtidsförsök under förvarets drifttid för att ge ytterligare information till den avslutande säkerhetsanalysen inför förslutning, se avsnitt 4.11. Som en integrerad del av forsknings- och utvecklingsarbetet studeras hur de tekniska lösningarna kan optimeras och göras mer effektiva, med bibehållen eller ökad säkerhet. Utvecklingsarbetet har hittills fokuserat på att finna lämpliga lösningar för enskilda system. Därför bedöms förutsättningarna för teknikoptimering som speciellt goda när det gäller samverkan mellan produktionslinjerna för de olika barriärerna samt för utvecklingen av de tekniska systemen inom respektive produktionslinje.

Vid regeringens prövning inför förslutning av ett slutförvar finns möjlighet för regeringen att hantera andra frågor, som till exempel informationsbevarande. Denna fråga kommer därför att vara aktuell för SKB att följa och arbeta med under hela slutförvarens drifttid, se avsnitt 4.13.1.

4.1.1 Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall – SFR

Uppförande

Under perioden fram till start för utbyggnaden av SFR, planeras viss teknikutveckling av barriärerna i syfte att verifiera krav och konstruktionsförutsättningar. Det ger möjligheter att optimera utformning av utbyggnaden av SFR och genomförandet av bergarbeten. Det gäller också utvecklingen av förslutningskomponenter, till exempel pluggar. De uppdateringar av barriärernas och andra förvarskomponenters egenskaper vid installation, som teknikutvecklingen leder till, kommer att utgöra underlag till analysen av säkerhet efter förslutning inför SAR. Innan bergarbetena kan påbörjas ska ett antal undersökningsborrhål förslutas. Förslutningstekniken kommer att anpassas till förhållandena vid SFR och ett program för kvalitetskontroll ska utformas och fastställas.

Vid byggstart ska krav och konstruktionsförutsättningar för utbyggnaden vara fastlagda. Uppförandet inleds med att nödvändig infrastruktur etableras. Därefter vidtar byggnation, tillverkning och installation av barriärerna samt förberedelser inför driftsättning. I slutskedet av uppförandet genomförs verifiering och validering av system och funktioner och uppförandeskedet avslutas med samfunktionsprovning.

Drift och förslutning

Innan provdrift påbörjas kommer en förnyad SAR att tas fram och förslutningsplanen uppdateras.

Inför rutinmässig drift av det utbyggda SFR tas en kompletterad SAR fram där erfarenheterna från provdriften inarbetas. Den platsbeskrivande modellen uppdateras utifrån information från detaljundersökningar under uppförandeskedet. Utfallet av provdriften förväntas inte föranleda några särskilda behov av teknikutveckling eller forskning inför rutinmässig drift.

Inför avveckling och förslutning av anläggningen, kommer teknik för förslutning och förslutningskomponenter att utvecklas med avseende på material och installation. Avvecklingsplanen kompletteras och en uppdaterad analys av säkerhet efter förslutning, kommer att ingå i en omarbetad SAR som tas fram inför förslutning.

4.1.2 Slutförvaret för långlivat avfall – SFL

I det fortsatta arbetet med SFL kommer slutsatser och erfarenheter från den genomförda säkerhetsvärderingen av det föreslagna slutförvarskonceptet att vara utgångspunkt för utvecklingen av de tekniska barriärerna, acceptanskriterierna för avfallet och arbetet med att lokalisera en plats för slutförvaret. I Fud-program 2019 beskrevs att ett program för planering och genomförande av slutförvaring av långlivat avfall skulle startas under 2020. SKB har valt att senarelägga implementeringen av det programmet för att först utveckla avfallskategorisering av det historiska avfallet. En senareläggning gör det också möjligt att ta till vara på erfarenheter från tillståndsprocesserna för SFR-utbyggnaden och KBS-3-systemet. Det planerade arbete som beskrivs i Fud-program 2019 (SKB 2019, avsnitt 4.1.2) kvarstår och kommer att återupptas och genomföras vid senare tillfälle. Fokus på utvecklingsarbetet under kommande Fud-period är på inventariet, emballage och acceptanskriterier.

I säkerhetsvärderingen identifierades bland annat följande behov av forskning och utveckling inför den kommande fullständig säkerhetsanalysen:

- Fördjupad kunskap om inventariet för avfallet som ska deponeras. Detta gäller såväl prognosticerade avfallsmängder, som avfallets materialsammansättning och innehåll av radionuklider (avsnitt 4.2).
- Utökad kunskap om utveckling över tid för betongbarriären i bergssalen för hårdkomponenter, BHK. Fortsatta studier av interaktion mellan grundvatten och betong under slutförvarsbetingelser (avsnitt 4.5).
- Utökad kunskap om utveckling över tid för bentonitbarriären i bergssalen för historiskt avfall, BHA (avsnitt 4.6).

Det har även identifierats behov av utveckling av verktyg och metoder som används i utvärderingen av säkerhet efter förslutning. Planeringen för att möta dessa behov är delvis avhängig resultaten av redan planerad forskning och utveckling kopplad till SFR och Kärnbränsleförvaret. Arbetsverktyg utvecklade inom säkerhetsvärderingen medger idag snabbare återkoppling på teknikutvecklingsinsatser, vilket ger en större flexibilitet i arbetet med säkerhetsanalysen. För den fortsatta utvecklingen av SFL, och specifikt för val av bästa möjliga teknik och optimering av förvarsdesignen, kommer SKB därför också att se över möjligheterna för en utökad funktionalitet hos verktygen för modellering av grundvattenflöde och radionuklidtransport i bergssalar och omgivande berggrund. I detta sammanhang är metoder som tillåter flexibilitet i geometrier och materialegenskaper av särskilt intresse.

Den fortsatta teknikutvecklingen baseras på tidigare genomförda utredningar rörande teknikutvecklingsbehoven, där kravbilderna kompletterats med slutsatser från den genomförda säkerhetsvärderingen. De huvudområden som bedöms kräva SFL-specifika utvecklingsinsatser är:

- Tekniska lösningar för utformning och uppförande av förvarsutrymmen.
- Tekniska lösningar för återfyllning av förvarsutrymmena med betong och bentonit.
- Hantering och slutförvaring av olika komponenter och utveckling och godkännande av slutförvarsemballage till dessa.

Till stöd för ansökningar enligt KTL och MB för att bygga och driva SFL behöver teknikutvecklingen, kunskapen om barriärerna av betong och bentonit och det naturliga systemet, det vill säga det omgivande berget och ekosystemet, vara driven så långt att det i säkerhetsanalysen går att visa att förvaret uppfyller kraven i MB (allmänna hänsynsreglerna) samt kraven i KTL och SSM:s föreskrifter. Krav och konstruktionsförutsättningar behöver presenteras och det ska göras troligt att den tekniska lösningen kan tas fram och installeras på ett sådant sätt att det går att verifiera att kraven kan uppfyllas. Då SFL skiljer sig från de övriga förvaren framför allt när det gäller konstruktioner i förvarsdelarna och de tekniska lösningarna för återfyllning, bedöms detta vara områden som behöver utvecklas.

Preliminära acceptanskriterier för avfallet behöver finnas, liksom tekniska lösningar för den eventuella behandling och konditionering av avfallet som kan komma att behövas för att det ska uppfylla acceptanskriterierna.

Uppförande, drift och förslutning

I den kommande prövningsprocessen enligt KTL, kommer uppdaterade redovisningar av verksamheten, anläggningens utformning och hur ställda krav uppfylls, beskrivas i de säkerhetsredovisningar som tas fram i stegen inför uppförande, drift och avveckling.

4.1.3 Kärnbränsleförvaret och Clink

Uppförande

Inför byggstart ska nödvändiga system, strukturer och komponenter vara specificerade, med funktion och prestanda fastställda. Inlämnandet av PSAR är en viktig milstolpe och avstämningsspunkt mot SSM. Den kommande kunskapsuppbyggnaden för frågor kring säkerhet efter förslutning är i första hand fokuserad på att leverera underlag till SAR. Ökad kunskap ger underlag för en bedömning om mindre försiktiga antaganden kan användas. Detta skulle dels ge förutsättningar att adressera kvarvarande osäkerheter i analysen av säkerheten efter förslutning, dels underlag för optimering av krav för förvarets komponenter och layout. I utformningen av inkapslingsdelen av Clink och av slutförvarsanläggningen ska förutsättningarna för kärnämneskontroll beaktas, se avsnitt 2.4.

Målet med teknikutvecklingen är att ta fram produkter som kostnadseffektivt uppfyller både externa och interna krav samt säkerställa att den teknik som behövs för att kunna påbörja detaljkonstruktion och upphandling av Kärnbränsleförvaret och inkapslingsdelen av Clink, finns tillgänglig.

För Kärnbränsleförvaret tas det underlag fram som behövs för att, redan under uppförandet av tillfarter, centralområde och första deponeringsområdet, omhänderta frågor som har betydelse för strålsäkerheten under anläggningens hela livscykel. Underlaget planeras att redovisas dels i ett dokument om säkerhet under uppförande av slutförvarsanläggningen (Suus), dels i ett detaljundersökningsprogram för uppförandefasen. Syftet är att identifiera de aktiviteter och åtgärder som är nödvändiga för att verifiera och vidareutveckla den platsbeskrivande modellen för Forsmark inför kommande analyser av säkerhet efter förslutning. Vidare behöver de tekniska system (till exempel för deponering och återfyllning) som ska finnas inom förvarsområdet, vidareutvecklas både inför PSAR och till SAR. Vid inlämnande av PSAR kommer planer för den fortsatta utvecklingen fram till SAR att presenteras som en del av ansökan inför uppförande av Kärnbränsleförvaret.

Teknik och metoder för inkapsling ska vara utvecklade och beskrivna inför detaljkonstruktion av inkapslingsanläggningen. De nödvändiga tekniska systemen ska vara specificerade, vilket innebär att den nukleära bränslemätningen och den valda metoden för torkning av bränsleelement behöver finnas utvecklade. På samma sätt behöver metoder för svetsning och kontroll av kapslarna under inkapsling vara framtagna och anpassade till den nukleära miljö som råder i Clink.

Inför byggstart av det första deponeringsområdet i Kärnbränsleförvaret kommer konstruktionsförutsättningar för detta att vara reviderade. Därmed behöver konstruktions- och installationsmetoder för buffert, återfyllning och pluggar finnas liksom metodiken för uttag av deponeringstunnlar och deponeringshål. Dessutom ska de kontrollmetoder som ska tillämpas vid detaljundersökningar vara verifierade. Vidare ska det finnas metoder för undersökning och modellering av berget i deponeringsområdet, eftersom att deponeringsområdet löpande ska anpassas till platsens betingelser baserat på resultat från genomförda detaljundersökningar.

I Forsmark har övervakningen av berget, grundvattnet och ekosystemet pågått i det närmaste oförändrat efter platsundersökningen och den planeras fortsätta fram till byggstart av Kärnbränsleförvaret. Viss anpassning har dock gjorts eller planeras till följd av utvärderingarna av insamlade mätdata. Övervakningen ger underlag för att fastställa en referensnivå som kan användas för att bedöma eventuell miljöpåverkan under förvarets uppförande och drift.

Den pågående övervakningen av geosfärs- och biosfärsparametrar planeras fortsätta under Kärnbränsleförvarets uppförande och drift. Det nya, i förhållande till platsundersökningen, är framför allt de undersökningar som kommer att utföras under mark. Inför uppförandet av Kärnbränsleförvaret kommer ett övervakningsprogram för uppförande- och driftskedena presenteras, se avsnitt 4.11.

Drift

Inför driftskedet för Kärnbränsleförvaret och Clink planeras produktionslinjetester och samfunktionsprovning som ska verifiera och validera att utbyggnad och deponering kan bedrivas så att kraven, både på säkerhet under drift och säkerhet efter förslutning, uppfylls. Dessa tester utförs i ett sent skede med den utrustning som ska användas i anläggningen och personalen som ska driva den. Detta blir en slutlig kontroll av att driften kan ske på avsett sätt.

Inför samfunktionsprovning ska samtliga system för hantering och transport av kapsel, buffert och återfyllning vara tillverkade, installerade och testade. Kvalificeringar av processer med tillhörande utrustningar, personal och leverantörer ska vara genomförda och dokumenterade. Vid denna tidpunkt ska ett antal system för kvalitetsstyrning och kontroll av barriärerna vara implementerade. Det gäller såväl produktion, hantering och installation av kapslar, buffert- och återfyllningskomponenter som bergbyggnad med tillhörande detaljundersökningar.

Den platsbeskrivande modellen kommer att uppdateras, baserat på tillkommande data från förvarsdjup, inför framtagandet av SAR inför provdrift. När förvarssystemet tas i rutinmässig drift, efter SSM:s godkännande av kompletterad SAR, övergår verksamheten i en förvaltningsfas, då SAR ska hållas aktuell. Även utvecklingsarbetet övergår då till en ny fas med fokus på optimering utifrån erfarenheter från driftsatta slutförvarsanläggningar.

Återtag av deponerade kapslar

Det finns i Sverige inget direkt krav på att använt kärnbränsle som deponerats i ett slutförvar ska kunna återtas. Om särskilda åtgärder vidtas för att underlätta återtag av deponerade kapslar, får dessa inte medföra att förvarets säkerhet efter förslutning äventyras. Det kan finnas situationer där återtag före förslutning kan bli aktuellt. SKB har bedömt och demonstrerat i försök i Äspölaboratoriet, att det är möjligt att återta deponerade kapslar under driften av Kärnbränsleförvaret. Rent principiellt skulle det gå att återta kapslar också från ett förslutet förvar, men genomförandet skulle bli arbets- och resurskrävande. Inkapslingsdelen av Clink konstrueras så att det blir möjligt att återföra kapslar med bränsle för förnyad inkapsling. Återtag planeras att kunna genomföras som en tänkbar åtgärd för att hantera eventuella fel eller kvalitetsbrister som uppstår eller upptäcks under deponeringssekvensen. Planeringen för eventuellt återtag kommer att redovisas i den PSAR som lämnas in inför uppförandet av Kärnbränsleförvaret respektive Clink.

För att möjliggöra ett återtag behövs viss teknikutveckling för att säkerställa att hela deponeringssekvensen kan reverseras, vilket inkluderar anpassning av maskiner och utrustning för att föra tillbaka kapslar. Även praktiska metoder att hantera bentonitblock som delvis har vattenmättat behöver tas fram.

Förslutning

Inför förslutning av Kärnbränsleförvaret tas en omarbetad SAR fram. Den innehåller en uppdaterad analys av säkerheten efter förslutning samt en plan för förslutning och avveckling. Den uppdaterade analysen av säkerheten efter förslutning, baseras på anläggningen som den är byggd och de planerade förslutningsåtgärderna samt den kunskap som inhämtats under driftperioden. Där redovisas den teknik och det arbetssätt som ska användas vid förslutning av kvarvarande bergutrymmen och borrhål (förslutning av deponeringstunnlar utförs under driftperioden) samt de åtgärder som planeras för att övervaka och kontrollera förvaret och verksamheten vid förslutningen.

4.2 Planerade insatser för låg- och medelaktivt avfall

För vissa material i det låg- och medelaktiva avfallet som ska slutförvaras i SFR respektive SFL, behövs en fördjupad förståelse för de processer som påverkar förvaret. Vidare behöver kunskapen om avfallets innehåll av radionuklider uppdateras och fördjupas. I kapitel 6 beskrivs nuläge och program för forskning och teknikutveckling avseende det låg- och medelaktiva avfallet.

4.2.1 Processer kopplade till materialegenskaper

För både SFR och SFL utgör fördröjning av uttransport av radionuklider från förvaret en central säkerhetsfunktion.

Sorption av radionuklider på cementmineral är en av de viktigaste processerna som fördröjer utsläppet av radionuklider från förvaren. Komplexbildande ämnen kan reducera sorptionen och därmed påskynda uttransporten av radionuklider.

Gasproduktion i slutförvarsmiljö kan leda till en tryckuppbyggnad och efterföljande påverkan på barriärernas funktion. Om gasproduktionstakten är så hög att den bildade gasen inte kan ledas ut på ett kontrollerat sätt, kan gastrycket pressa ut radionuklidhaltigt vatten och i värsta fall skada barriärer i slutförvaret. Gasproduktionen beror huvudsakligen på nedbrytning av material genom till exempel korrosion, mikrobiell- eller strålningspåverkan.

Även svällande avfall kan påverka betongbarriärers integritet och därmed påverka uttransporten av radionuklider.

SKB kommer under Fud-perioden att fortsätta fördjupa kunskapen inom dessa processer, där sorption av viktiga ämnen samt nedbrytningen av utvalda organiska material till potentiella komplexbildare kommer att studeras vidare. Vidare avser SKB att även fortsatt undersöka svällning av bitumen-solidifierat avfall under slutförvarsliknande förhållanden.

4.2.2 Radionuklidinventarium

För att säkerställa ett tillräckligt väl bestämt radionuklidinventarium i det låg- och medelaktiva avfallet inför kommande analyser av säkerheten efter förslutning för SFR och SFL, behöver kunskapsläget fördjupas. Radionuklidinventariet uppdateras löpande och särskilda insatser görs för bestämning av så kallade svärmätbara nuklider, vilka i många fall har betydelse för säkerheten efter förslutning. Eftersom uppmätt aktivitet för svärmätbara nuklider endast finns som indirekta mätningar eller som analyser av enstaka prov, är det nödvändigt att tillämpa beräkningsmodeller för att uppskatta radionuklidinventariet för dessa.

Under Fud-perioden kommer SKB att fortsätta utveckla modeller för aktivitetsbestämning av svärmätbara nuklider, dels genom att utnyttja det underlag av mätdata som nyligen sammanställts, dels genom att genomföra ytterligare verifierande mätningar av dessa nuklider.

4.2.3 Acceptanskriterier för avfall i SFL och det utbyggda SFR

I dagsläget finns en betydande mängd långlivat avfall i mellanlager hos avfallsproducenterna och ytterligare långlivat avfall kommer att uppstå under fortsatt drift och rivning av de kärntekniska anläggningarna. För att kunna ta ställning till om avfallet från avfallsproducenterna karakteriseras i tillräcklig utsträckning för att uppfylla säkerhetskraven i framtida slutförvar, finns ett behov av acceptanskriterier för slutförvaring i både SFL och i det utbyggda SFR. I takt med att detaljerna kring förvarens utformning konkretiseras kommer kravbilderna att kunna preciseras, där resultaten från säkerhetsvärdering för SFL respektive säkerhetsanalyserna för det utbyggda SFR ligger till grund för uppdaterade acceptanskriterier.

4.2.4 Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

För att kunna genomföra avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna på ett optimalt sätt, behöver utvecklingsarbetet avseende avfallsbehållare och avfallstransportbehållare för det låg- och medelaktiva avfallet löpande följas upp. Strategin är att i första hand undersöka tillämpligheten hos redan befintliga avfallsbehållare för deponering i kommande och befintliga slutförvar. Behovet av nya avfallstransportbehållare styrs av vilka tillkommande avfallsbehållare som kommer att utvecklas. Möjligheten att modifiera befintliga avfallstransportbehållare för att inrymma ytterligare avfallsbehållartyper ses regelbundet över.

4.3 Planerade insatser för använt kärnbränsle

Det använda kärnbränslet är långlivat och högaktivt och kräver strålskärning vid all hantering, lagring och slutförvaring. Det utgör en mindre del av det kärnavfall som ska slutförvaras, men innehåller den helt dominerande mängden av all radioaktivitet. Använt kärnbränsle kan bli kritiskt och måste hanteras på sådant sätt att det inte uppnår kriticitet.

Om en kapsel i Kärnbränsleförvaret skulle bli otät och om vatten skulle tränga in, är bränslets egenskaper avgörande för hur snabbt radioaktiva ämnen frigörs. Resultat från tidigare säkerhetsanalyser visar att den hastighet med vilken radionuklider frigörs från bränslets olika delar signifikant påverkar analysen av Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning. Upplösning av använt bränsle i slutförvaringsmiljö är därmed en central del i säkerhetsanalysen.

De kommande åren behövs både forskning för kommande analyser av säkerhet efter förslutning, och teknikutveckling gällande hantering av det använda kärnbränslet i de olika delarna av KBS-3-systemet.

Teknikutveckling för hantering av bränsle sker i takt med att detta behövs som underlag till systemkonstruktion och detaljkonstruktion av Clink, och färdigställs under uppförande och driftsättning av anläggningen. I kapitel 7 beskrivs nuläge och program för forskning och teknikutveckling under Fud-perioden avseende det använda kärnbränslet.

4.3.1 Bränsleintegritet, bränslekaraktisering och bränsleinformation

För att säkerställa att allt använt kärnbränsle kommer att kunna hanteras både i Clab och i inkapslingsanläggningen, bedrivs ett program för kontroll av bränslets integritet (det så kallade åldringsprogrammet), där förändringar i bränslets egenskaper under lagring i bassängmiljö studeras. SKB följer även internationell forskning och erfarenhet beträffande förändringar i bränslets integritet. Det är viktigt att säkerställa att bränslet inte påverkas negativt av den planerade hanteringen i samband med lagring och inkapsling. Icke-reguljära bränslen utgörs av bränslen vars egenskaper kräver speciella analyser eller åtgärder i något eller flera hanteringssteg. Två viktiga exempel är skadat bränsle och bränslerester från analyser av olika slag, framför allt från Studsvik. Resultaten av insatserna inom detta område kommer att användas i kommande säkerhetsredovisningar.

Arbetet med att samla information om det använda kärnbränslet fortsätter. Kommande utredningar ska visa hur informationen bäst ska hanteras och lagras inför driftsättning av det kompletta KBS-3-systemet.

Det använda kärnbränslets resteffekt är en central egenskap som påverkar många aspekter i hela hanteringskedjan och i slutförvaret, exempelvis vid inkapsling där val av bränsleelement för inkapsling till stor del kommer att styras av individuella bränsleelements resteffekt. Arbetet med bestämning av resteffekt med hjälp av kalorimetri och genom nukleära bränslemätningar (framför allt gamma och neutroner) fortsätter. Förutom att ge information om resteffekt för att välja bränsleelement inför inkapsling, är ett viktigt syfte med arbetet att ge underlag till utformningen av de delar av inkapslingsanläggningen där mätutrustningen ska finnas. Dessutom syftar arbetet med bränslemätningar till att säkerställa att tillräcklig kunskap om bränslenas resteffekt finns tillgänglig för de kommande stegen i tillståndsprocessen för KBS-3-systemet.

4.3.2 Kriticitet, strålning och kärnämneskontroll

Metodutveckling pågår för analys av kriticitet i olika scenarier under drift och efter förslutning av förvaret. SKB:s metodik för kriticitetsanalys ska kompletteras med en strategi för att hantera bränsleknippen som inte möter utbränningskraven. De beräkningar som görs med numeriska metoder ger också underlag för bedömning av strålfältets påverkan på omgivningen.

Inom området kärnämneskontroll fortsätter den pågående utvecklingen av metoder för märkning och identifiering av kopparkapslar med använt kärnbränsle, i samverkan med IAEA, Euratom och SSM, se avsnitt 2.4.

4.3.3 Bränsleupplösning, radionuklidspeciering och lösligheter

Upplösning av bränslet i slutförvaret är en fundamental process i analysen av säkerhet efter förslutning. En fördjupad förståelse av processer som sker vid radiolytisk oxidation av bränslet, är viktig för tolkningar av experimentella data. Kunskap om hur strålning, vätgas, oxidanter samt övriga joner i vattenlösning påverkar oxidation och upplösning av uran behöver inkorporeras i en modell som kan beräkna bränslets upplösningshastighet. Det behövs fortsatt forskning som kan bidra till en bättre modell, till exempel reaktionshastigheter för relevanta yreaktioner och hur dessa hastigheter ändras med tid och andra parametrar.

Fördelningen av radionuklider i bränslets olika delar, speciellt hur stor del som sitter mellan kuts och kapsling, har också betydelse för analysen av säkerhet efter förslutning. Detta varierar beroende på bränsletyp, effekthistorik och utbränning. Fortsatt forskning krävs inom området för att spegla den variation av bränslen som kommer deponeras i Kärnbränsleförvaret. Det finns kvarvarande osäkerheter angående speciering och lösligheter av frigjorda radionuklider, inklusive uran. Då förståelse av urankemi i slutförvarsmiljö är en hörnsten i beskrivningen av den kemiska utvecklingen i en läckande, vattenfylld kapsel, behövs fortsatta forskningsinsatser även inom detta område.

4.4 Planerade insatser för kapsel för använt kärnbränsle

Kopparkapseln utgör den viktigaste barriären i KBS-3-systemet genom att den ska innesluta det använda kärnbränslet under tillräckligt lång tid för att radionukliderna ska hinna sönderfalla så mycket att de inte längre utgör någon risk för människor och miljön.

I detta avsnitt beskrivs behoven av kompletterande forskning om egenskaper hos kapseln (kopparkapsel och insats) inför kommande säkerhetsredovisningar för Kärnbränsleförvaret. Vidare beskrivs behoven av teknikutveckling för att kapseln ska kunna tillverkas, kontrolleras, verifieras mot ställda krav och användas inom KBS-3-systemet. I kapitel 8 redogörs för nuläge och program för det planerade utvecklingsarbetet under Fud-perioden.

4.4.1 Processförståelse

Inför kommande steg i KTL-prövningen för Kärnbränsleförvaret har SSM pekat på områden med återstående behov av analyser. Flertalet av dem rör kapseln och dess funktion i förvaret. För att utveckla analysen av säkerhet efter förslutning behövs både mer kunskap om processerna som påverkar kapseln i förvaret och en förfinad användning av denna kunskap i analysen, och detta uppnås genom en iterativ process. SKB förutser därför att fortsätta studera processer kopplade till kapseln för att stärka underlaget till analysen av Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning.

Korrosion

Om lerbufferten som omger kapseln eroderas så att advektiva förhållanden uppstår, utgör sulfidkorrosion den mest betydande korrosionsprocessen för kopparkapseln. Genom främst elektrokemiska experiment bedrivs studier för att undersöka de detaljerade mekanismerna för korrosionen, kopparytans utseende efter korrosion, liksom förutsättningar för att korrosionen skulle kunna vara mer koncentrerad (lokal), vilket ger djupare angrepp för en specifik mängd korrosion än om den är mer jämt utbredd. SKB kommer också att fortsätta studera mekanismerna för spänningsskorrosion liksom att utveckla modelleringen av lokal korrosion i analysen av säkerhet efter förslutning. Ett särskilt fokus kommer att ligga på perioden med omättad bentonitbuffert. En ökad förståelse för vilka sulfidkoncentrationer som kan finnas i förvarsmiljön, både i lermaterialen och i berget, är viktig för att i möjligaste mån undvika överskattningar av transporten av sulfid till kapseln (och därmed av korrosionen).

Materialegenskaper kapselmateriäl

SKB har som kapselmateriäl valt en syrefri koppar, med låga halter av föroreningar, till vilken små mängder fosfor tillsätts för att få gynnsamma krypegenskaper (tillräckligt hög duktilitet). Effekten av fosfor är belagd genom omfattande krypprovning, men för analysen av säkerhet efter förslutning behöver en bättre förståelse utvecklas för att visa att materialegenskaperna inte ändras över långa tider.

SKB kommer därför att fortsätta studierna av fosfors effekt på krypegenskaperna, både experimentellt och teoretiskt. Det finns också planer på fortsatta undersökningar för att studera eventuell inträngning av väte i koppar, och om detta i så fall påverkar materialegenskaperna på något signifikant sätt. Även åldring av insatsmaterialen, såväl statisk som dynamisk, kommer att studeras vidare.

4.4.2 Konstruktion

SKB kommer fortsätta att utveckla kraven för kapseln och dess ingående komponenter. Arbetet omfattar krav för både tillverkning som hantering av respektive kapselkomponent och kapseln som helhet.

För att säkerställa en tillförlitlig framtida industriell produktion av kapseln och dess komponenter fortsätter SKB att utveckla och optimera både tillverkningsmetoder och utformning. Ett exempel är insatsens detaljkonstruktion där alternativa konstruktioner och tillverkningsmetoder utvärderas. För att kunna producera en robust insats är det viktigt att både tillverknings- och kontrollspekter av kapseln och de laster som kapseln kan komma att utsättas för, både under hantering och efter deponering, beaktas i detaljkonstruktionen. Det handlar till exempel om att optimera designen av stållocket med tillhörande packning med syfte att säkerställa säker och tillförlitlig hantering i Clink och att kravet på miljön i insatsen uppfylls.

4.4.3 Tillverkning, kontroll och provning

För att säkerställa att kapseln och dess ingående komponenter kan tillverkas på ett tillförlitligt sätt enligt fastställda krav, är det av stor vikt att ha tillräcklig förståelse om respektive komponents tillverkningsprocess. Denna förståelse erhålls genom en processkartläggning av tillverkningskedjan för respektive kapselkomponent. Med utgångspunkt från processkartläggningarna kommer processfönster och detaljerad specifikation för respektive process i tillverkningskedjan att utprovas och fastställas. Detta utgör förutsättningarna för kommande kvalificering av processerna. Utifrån processkartläggningar ska produktions- och mätsystem av särskild betydelse för säkerheten efter förslutning vara utprovade och kvalificerade inför provdrift.

4.5 Planerade insatser för cementbaserade material

Cementbaserade material förekommer i avfallsmatriser, barriärer och konstruktioner i SFR och SFL. I alla förvar används cementbaserade material i pluggar, bergförstärkning och vid injektering. I detta avsnitt beskrivs översiktligt den forskning som behövs för att få ökad processförståelse för egenskaperna hos de cementbaserade material som används i förvarskonstruktioner och andra delar av vikt för förvarens säkerhet efter förslutning. Vidare beskrivs den teknikutveckling som behövs för utformning av betongkonstruktioner, material och produktionsmetoder till de olika förvaren.

Nuläge och program för Fud-perioden för cementbaserade material redovisas i kapitel 9.

4.5.1 Processförståelse

Under den tidsperiod som analysen av säkerheten efter förslutning omfattar, kommer de cementbaserade materialens kemiska och mekaniska egenskaper sakta att förändras. Dessa förändringar kan orsakas av såväl kemiska som mekaniska processer eller kombinationer av dessa. Cementbaserade material har i flera avseenden en central funktion i upprätthållande av säkerheten efter förslutning och SKB bedriver ett löpande arbete för att upprätthålla och förstärka förståelsen av de processer som kan påverka utvecklingen av materialens egenskaper över tid.

Under Fud-perioden avser SKB att fortsätta att driva och utveckla programmet för studier av utvecklingen av barriärernas kemiska och mekaniska egenskaper över tid, under påverkan av de kemiska processer och mekaniska laster som de kommer att utsättas för under förvarens livstid. Arbetet kommer även fortsättningsvis att bedrivas i form av både experimentella studier och datorbaserade modelleringar.

4.5.2 Utformning av betongkonstruktioner och material

Inför utbyggnaden av SFR och inför uppförande av Kärnbränsleförvaret genomför SKB ett omfattande utvecklingsarbete kopplat till utformning av betongkonstruktioner och material till de olika förvaren.

SFR

Under Fud-perioden fortsätter arbetet med utformning av försvarskonstruktioner och utveckling av material till dessa. Programmet tar avstamp i erfarenheter och resultat från det arbete som genomförts, med fokus på

- utformning av betongkonstruktioner
- vidareutveckling av tillverkningsmetod för material
- produktionsmetod för kassuner
- system för gastransport.

Inriktningen kommer att skifta från materialutveckling och utveckling av teknik för uppförande till mer produktionsrelaterade aspekter.

Kärnbränsleförvaret

Dagens konstruktionsförutsättningar och krav på Kärnbränsleförvaret förutsätter användning av låg-pH-material för, att säkerställa att materialens lakningsprodukter inte påverkar bentoniten i buffert och återfyllning negativt.

Under Fud-perioden kommer det pågående analysarbetet rörande spridning av en pH-plym i bergmassan, från cementbaserade material som används för injektering och bergförstärkning att avslutas. Med detta som underlag kommer programmet för cementbaserade material i Kärnbränsleförvaret att formuleras.

Arbete med specificering av krav och konstruktionsförutsättningar för pluggen till deponerings-tunnlarna fortsätter, med utgångspunkt i den senaste inriktningen på tunneltvärsnitt för tunnlar.

4.6 Planerade insatser för lerbarriärer och förslutning

Huvudsyftet med lerbarriärerna i Kärnbränsleförvaret (buffert och återfyllning), SFR (mellan berget och betongsilon) och SFL (återfyllningen i BHA) är att begränsa vattenflödet runt kapslar respektive runt avfallsbehållare för låg- och medelaktivt avfall. Detta åstadkoms med ett material med en låg hydraulisk konduktivitet och en svällförmåga som gör att den installerade barriären homogeniseras, fyller hålrum och tätar till mot berget och andra försvarskomponenter. För analysen av säkerhet efter förslutning återstår flera frågor kring lerbarriärerna. För Kärnbränsleförvaret och det utbyggda SFR behövs mer kunskap i första hand fram till SAR, med kunskapsläget vid PSAR och inför beslut om byggstart är viktiga milstolpar och avstämningpunkter. Kunskapen om bentonitens egenskaper och funktion behöver också stärkas för det fortsatta arbetet med säkerhetsanalyserna för SFL.

De flesta processer i bentonitbarriärerna är gemensamma för de olika anläggningarna. Resultaten från den forskning som bedrivs för Kärnbränsleförvaret kan till största delen också appliceras på barriärerna i SFL och silon i SFR. Nuläge och programmet under Fud-perioden för lerbarriärer och förslutning redovisas i kapitel 10.

4.6.1 Processförståelse

Utveckling efter installation fram till vattenmättnad

I både Kärnbränsleförvaret och bergssalen för historiskt avfall i SFL (BHA) kommer lerbarriärerna att installeras som en kombination av kompakterade block och pellets eller granulat tillverkade av bentonit. Bentonitbarriären har därför initialt varken svälltryck eller låg hydraulisk konduktivitet. Dessa egenskaper utvecklas i och med att bentoniten tar upp vatten från det omgivande berget.

I berget i Forsmark förväntas en stor andel av deponeringshålen i Kärnbränsleförvaret att vara delvis omättade under 1 000 år eller längre. För bentonitens funktion har detta ingen större betydelse, men den kemiska miljö som står i kontakt med kapseln kommer att vara annorlunda än den som råder under mättade förhållanden. Transport av ämnen i gasform i en omättad buffert kan ske betydligt snabbare än transporten av ämnen i en mättad buffert. En bättre förståelse för gasens sammansättning under den omättade perioden är därför nödvändig för att säkrare kunna värdera betydelsen av eventuell korrosion på kopparytan under denna period. För att kunna dra slutsatser om bentonitens långsiktiga funktion, i SFL behöver dess utveckling i BHA under den omättade perioden utvärderas när plats för förvaret har valts.

Under perioden från installation av bentonitbarriärerna fram till dess att ett svälltryck har etablerats, kan det förekomma mycket höga vattentrycksgradienter i barriärerna. Tillsammans med inflöden av vatten kan detta orsaka kanalbildning och erosion av material, framför allt i pellets- eller granulatfyllningar. För att kunna utvärdera konsekvenserna av detta är det viktigt att förstå hur vatten tas upp i pelletsfyllningar under olika förhållanden.

För att mer utförligt kunna förstå och beskriva bentonitmateriallets utveckling fram till mättnad behövs fortsatta forsknings- och utredningsinsatser kring framför allt följande frågor:

- Gassammansättning och dess utveckling i den omättade bentoniten (främst när det gäller innehåll av syre och vätesulfid).
- Kanalbildning/erosion.
- Vattenuptag och svällning samt homogenisering av block och pellets.
- Mikrobiell sulfatreduktion/sulfidbildning.

Egenskaper i mättat tillstånd

Som tidigare nämnts är lerbarriärernas huvudfunktion att begränsa vattenflödet kring avfallet i de olika förvaren. Detta åstadkoms genom låg hydraulisk konduktivitet, vilket medför att diffusion blir den dominerande transportmekanismen, samt genom ett svälltryck som leder till att bufferten blir självförslutande. I Kärnbränsleförvaret ska bufferten också hålla kapseln på plats i deponeringshålet, dämpa bergets skjuvrörelser, begränsa den mikrobiella aktiviteten på kapselns yta och filtrera kolloidala partiklar. Bentonitens viktigaste egenskaper, det vill säga låg hydraulisk konduktivitet, högt svälltryck och hög skjuvhållfasthet, kan samtliga relateras till dess densitet. Sambandet är unikt för varje bentonittyp och kan för en given typ av bentonit variera med dess sammansättning (till exempel montmorillonithalten). Det är viktigt med en grundläggande förståelse för kopplingen mellan bentonitmateriallets sammansättning och dess egenskaper. För att få detta, kommer SKB att fortsätta med detaljerade studier av kopplingen mellan materialets sammansättning och dess egenskaper för olika bentonitmaterial.

För Kärnbränsleförvaret och SFL behövs också fortsatta insatser kring bentonitförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion. Resultaten kan direkt påverka utfallet av analysen av säkerhet efter förslutning, genom att möjliggöra mindre konservativa antaganden kring buffertförluster.

Insatser behövs också kring bentonitens långsiktiga stabilitet med hänsyn till temperatur, järninnehåll och samspelet med cement. Interaktionen mellan bentonit och cement är en av de viktigaste processerna för säkerhet efter förslutning i SFL. Kunskap om denna interaktion kan också tillämpas för utvärderingen av säkerhet efter förslutning för silon i SFR.

4.6.2 Utformning av barriärer samt tillverkning, kontroll och provning

Teknikutvecklingen för mekanisk brytning av tunnlar har gått framåt i omvärlden och SKB utreder möjligheten att använda tekniken för produktionen av deponeringstunnlar i Kärnbränsleförvaret. Även återfyllningens utformning utreds med utgångspunkten att möjliggöra industrialisering av installationen. Fortsatt utveckling av återfyllningens utformning behövs avseende verifiering av återfyllningens förmåga att utgöra mothåll för uppåtsvallande buffert. Dessutom behöver kraven uppdateras och förtydligas.

Krav på installationssekvens och installation av buffert- och återfyllningskomponenter, som är beroende av vatteninflödet i deponeringshålen, kommer att uppdateras och tydliggöras. En viktig fråga är hur termiska, hydrauliska och mekaniska processer i bufferten påverkar densiteten från det att bufferten placeras i deponeringshålet tills återfyllningen installeras över deponeringshålet. Fortsatta fullskaletest kommer att genomföras för att utreda hur stora vatteninflöden bufferten tål under installationen. I arbetet med att säkerställa en tillförlitlig produktionsprocessen av buffertblock, inriktas fortsatt utveckling mot segmenterade bufferttringar med fokus på att ta fram toleranser för att säkerställa funktion och industriell producerbarhet och installation.

Mätningar på olika bentonitmaterial som behövs för att säkerställa kravuppfyllnad, som till exempel hydraulisk konduktivitet och svälltryck, kommer att fortsätta, både för att öka kunskapen om olika material och för att utveckla kompetens och mätmetoder.

4.6.3 Installation av buffert och återfyllning

Till tekniska system för deponering hör till exempel deponeringsmaskin, återfyllningsrobot och transportsystem för buffert och återfyllningskomponenter. Prototyper och principlösningar för deponeringsarbetet finns framme. Deponeringsprocessen avses bli automatiserad och för att styra och övervaka ett sådant system pågår utveckling av ett överordnat styrsystem. Vidareutveckling av maskiner kommer att fortsätta och utrustningarna behöver anpassas för segmenterade buffertblock.

4.6.4 Förslutning av borrhål och förvar

Förslutningsplanen för Kärnbränsleförvaret kommer att uppdateras, liksom kraven för att få en effektiv förslutning.

En metod för borrhålsförslutning har tagits fram. Ytterligare utveckling kommer att ske i syfte att förenkla installationen och göra möjligt att installera även i flacka och horisontella borrhål. Som en del av översynen kommer behov av verifierande tester att inventeras och tester genomföras.

4.7 Planerade insatser för berg

Berggrundens viktigaste funktion i slutförvaranläggningarna är att säkerställa stabila mekaniska och kemiska förhållanden samt att begränsa vattenflödet i och i anslutning till förvaren över den tid som avfallet behöver isoleras från människor och miljön. För att detta ska kunna uppnås behövs tillräcklig kunskap om förhållandena i berggrunden och om de processer som förändrar de mekaniska och kemiska förhållandena i och kring förvaret. Vidare behöver bergutrymmena utformas på ett sådant sätt att de långsiktigt stabila förhållandena inte äventyras. En stor del av de forsknings- och teknikutvecklingsfrågor som rör berget och slutförvaranläggningarnas bergutrymmen är gemensamma för alla tre slutförvaren.

Den teknikutveckling inom bergområdet som behövs för Kärnbränsleförvaret som underlag till PSAR, är genomförd och redovisningen av säkerhet under uppförande av slutförvaranläggningen (Suus) och inför byggstart är under framtagande. Ytterligare metodutveckling inför SAR bedöms kunna leda till mer effektiva urvalskriterier för deponeringshål, vilket i sin tur medför att färre hål behöver väljas bort. I avsnitt 4.7.1 till 4.7.4 sammanfattas de områden med kvarstående bergfrågor vad avser forskning och analys av säkerhet efter förslutning. Nuläge och program för Fud-perioden avseende berg redovisas i kapitel 11.

4.7.1 Karakterisering och modellering av bergets egenskaper

Modellering av bergmassans mekaniska egenskaper med kopplade modeller förutsätter att bergets egenskaper kan ansättas oberoende av modelleringsverktyg och numerisk upplösning. Det finns öppna frågor i den grundläggande förståelsen av de mekaniska egenskaperna hos enskilda sprickor och spricksystem samt hur dessa samverkar med termiska och hydrauliska egenskaper, vilket i sin tur påverkar bergets hydrogeologiska-, geokemiska- och transportegenskaper.

Sprickpropagering i kristallint, hårt berg beror på de mekaniska, termiska och hydrauliska egenskaperna samt på bergspänningsförhållanden. I ett långsiktigt perspektiv påverkas sprickors tillväxt även av de grundvattenkemiska förhållandena. Integrerad modellering behövs för att bedöma betydelsen av inducerade rörelser, både i när- och fjärrområdet, som en följd av termiskt, seismiskt eller glaciellt inducerade belastningar.

De beräkningar av bergspänningar inom förvarsvolymen för Kärnbränsleförvaret i Forsmark som gjorts hittills, är behäftade med osäkerheter, främst på grund av databrist. För att samla mer data behövs såväl in situ-mätningar som modellering, vilket även kommer att ge underlag för att förbättra beskrivningen av spänningsfältets spatiala variabilitet avseende storlek och riktning.

4.7.2 Modellering av diskreta spricknätverk

Diskreta spricknätverk (DFN) används inom modellering av bergmekanik, grundvattenflöde och transport av lösta ämnen. Beskrivningen och parametreringen av enskilda sprickor utgör viktiga indata vid analys av många frågor som spelar roll för förvarens säkerhet efter förslutning, liksom för frågor som behöver besvaras under konstruktions- och driftfasen. En DFN-metodik har tagits fram och den kommer att fortsatt prövas och utvecklas under de kommande åren.

4.7.3 Seismisk påverkan på förvarens säkerhet

Den forskning om jordskalv som bedrivs av SKB kan grovt delas in i de delvis överlappande disciplinerna paleoseismologi, instrumentering och modellering. Det huvudsakliga syftet med forskningen är att säkerställa att den seismiska risken inte är underskattad, att de negativa effekterna på förvarssystemet som beräknats i modeller inte underskattats samt att utreda möjligheten till ett effektivare nyttjande av förvarsvolymen.

Jordskalv i Kärnbränsleförvarets närområde skulle kunna orsaka skjuvrörelser längs sprickor som skär kapselpositioner. Om skalven är tillräckligt stora och sker tillräckligt nära förvaret, induceras sekundära skjuvrörelser. Dessa kan, om de sker längs olämpligt belägna och orienterade sprickor, överskrida kapselns hållfasthet. För SFL behöver möjliga konsekvenser av jordskalv utvärderas när plats och koncept för förvaret har valts.

En kvarvarande osäkerhet rör sambandet mellan jordskalvens frekvens och magnitud samt dess variabilitet under en glaciationscykel. Den adresseras delvis genom studier av paleoseismiska händelser och fördjupade studier av mätta data från skalv. Även modelleringen av sekundärrörelser i sprickor behöver utvecklas för att möjliggöra mindre försiktiga antaganden inför beräkningar i kommande säkerhetsanalyser.

4.7.4 Grundvattenflöde, grundvattenkemi och transport av lösta ämnen

Under de senaste åren har hydrogeologisk modellering utvecklats så att geokemiska processer och transportprocesser nu kan integreras med flödesmodelleringen. Insatser behövs för att vidareutveckla och testa dessa nya verktyg samt att utöka deras användningsområden (till exempel genom att inkludera mikrobiella processer) för användning inom platsmodellering och säkerhetsanalys. Vidare planeras en utveckling av de hydrogeologiska simuleringsverktygen för att kunna göra vissa grundvattenflödes- och radionuklidtransportberäkningar i ett och samma verktyg utan export/import av datafiler med intermediära resultat.

Beträffande transport av lösta ämnen behövs insatser om matrisdiffusion och sorption, vad gäller konceptuell förståelse, reducerad osäkerhet i transportparametrar och vidareutveckling av modelleringsverktyg. Detta berör främst Kärnbränsleförvaret och SFR. Insatserna kan framför allt leda till att det går att använda mindre försiktiga antaganden i analysen av säkerhet efter förslutning genom att kunna använda platsspecifika data med ett reducerat osäkerhetsintervall jämfört med de data som används idag.

4.8 Planerade insatser för ytekosystem

SKB:s forskningsprogram för ytekosystem syftar i första hand till att skapa underlag för beräkningar av potentiell stråldos till människor och miljön i analyserna av säkerheten efter förslutning för de olika förvararna. Programmet ger också underlag för miljöövervakning, bedömningar av eventuella miljöförändringar och för analysen av säkerheten i anläggningar i drift. Nuläge och program för Fud-perioden redovisas i kapitel 12.

Forskningsfrågor som rör ytekosystemen handlar i första hand om förhållanden och processer som påverkar radionuklidomsättning samt om hur befintlig och ny kunskap ska appliceras i dosberäkningar i analyser av säkerhet efter förslutning. Forskningsfrågorna för ytekosystem är i princip desamma för alla tre slutförvararna. Inför SAR för Kärnbränsleförvaret och för utbyggt SFR, liksom inför F-PSAR för SFL, finns ett antal frågor där ytterligare insatser behövs, främst för att reducera användningen av alltför försiktiga antaganden i analysen av säkerhet efter förslutning. De viktigaste kvarstående frågorna finns inom fyra olika områden:

- Upptagsvägar och upptagsmekanismer för olika organismer.
- Temporal och spatial heterogenitet i landskapet.
- Transport- och ackumulationsprocesser.
- Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos vissa ämnen (till exempel kol, klor och urans sönderfallskedja).

4.9 Planerade insatser för klimat och klimatrelaterade processer

Det övergripande syftet med arbetet om klimatfrågor är att förse SKB:s säkerhetsanalyser med vetenskapligt underbyggda och uppdaterade scenarier för framtida klimatutveckling, vilka sedan ligger till grund för utvärderingen av förvararens säkerhet efter förslutning. Beroende på möjliga framtida klimatutvecklingar finns för de olika förvararkoncepten specifika frågor som ska hanteras i säkerhetsanalyserna.

För att hantera de osäkerheter som finns i den framtida klimatutvecklingen på de tidsskalor som analyserna av säkerhet efter förslutning täcker samt för att kunna besvara de specifika frågeställningar som ställs för de olika förvararkoncepten, krävs en uppsättning skräddarsydda klimatscenarier för respektive förvararkoncept/säkerhetsanalys. Klimatscenierna baseras dels på kunskap om historiska klimat, dels på modellering av det framtida klimatet. Övergripande handlar arbetet kring klimatfrågor därför om att utveckla processförståelse, ta fram klimathistoria, uppdatera klimatscenarier och validera de modeller och den metodik som används för att beskriva spännvidden av de klimat och klimatrelaterade processer som slutförvararen kan komma att utsättas för under de kommande 100 000 till en miljon åren. Dessutom ska övriga ämnesområden som ingår i SKB:s analyser av säkerhet efter förslutning förse med indata, antaganden och randvillkor för klimat och klimatrelaterade processer, såsom utvecklingen av klimatparametrar, permafrost, inlandsis, erosion av berggrundsytan samt förändring av havsnivå.

Det finns frågor med bäring på alla slutförvararna som behöver studeras vidare för att minska osäkerheter och underbygga trovärdigheten i analysen av säkerhet efter förslutning. Utöver det behöver forskning bedrivas för att utvärdera den metodik som används för att hantera klimatfrågor i säkerhetsanalyserna samt arbete genomföras för att säkerställa att klimatscenierna är i fas med rådande kunskapsläge. I tillägg till att förse säkerhetsanalyserna med information och data relaterar vissa av frågorna även till utformningen av Kärnbränsleförvarets och SFR:s ovanmarksdelar.

En av huvuduppgifterna för klimatforskningsprogrammet är att ajourhålla, och vid behov utvärdera och komplettera, de klimatscenarier som används i SKB:s säkerhetsanalyser. För att uppnå detta behöver följande studeras vidare:

- Analys av extremer hos klimat och klimatrelaterade processer.
- Historiska klimatförändringar under senaste glaciala cykeln.
- Havsnivåvariationer och strandlinjeförskjutning på kort och lång sikt.

- Denudationsprocesser som påverkar bergytan i Forsmark, inklusive kvantifiering av historisk och framtida glacial erosion.
- Inlandsisars dynamik och beteende.

Nuläge och program för Fud-perioden avseende klimat redovisas i kapitel 13.

4.10 Äspölaboratoriets avslutande

I FoU-program 86 redovisade SKB planerna för ett berglaboratorium under mark. Laboratoriet skulle bland annat ge möjligheter till utveckling och utprovning av undersökningsmetoder, öka förståelsen för grundvattenströmningar i en stor bergdomän och utgöra plats för geovetenskapliga undersökningar och experiment, till exempel om nuklidtransporter med grundvattnet. I berglaboratoriet skulle olika in situ-försök, storskaliga demonstrationsförsök och utprovning av anläggnings- och utförandeteknik för slutförvar kunna utföras. Planerna resulterade i Äspölaboratoriet som togs i rutinemässig drift 1995 och som har varit en viktig del i SKB:s arbete med utformning, byggande och drift av slutförvar. Efter tre decennier av forskning och utveckling vid Äspö är de ursprungliga målen med berglaboratoriet uppfyllda. Äspölaboratoriet som anläggning beskrivs närmare i avsnitt 5.4.1.

4.10.1 Pågående långtidsförsök

Fältarbetet av de långtidsförsök som fortfarande pågår under aktiv övervakning kommer att kunna avslutas inom Fud-perioden.

Prototypförvaret

Det enskilt största kvarstående arbetet i berglaboratoriet handlar om brytningen av Prototypförvaret, ett fullskaleförsök installerat på 450 meters djup. Det innehåller kapslar och buffert med liknande referensutformning som i de planerade slutförvaret tillsammans med inaktuella versioner av återfyllning och plugg. Försöksgalleriet bestod ursprungligen av två sektioner, en yttre sektion med två deponeringshåll som återtog i början av 2010-talet, och en inre sektion med fyra deponeringshåll som avses brytas under Fud-perioden. Planer för brytningen av den yttre sektionen och summering av resultat (Svemar et al. 2016) har presenterats i tidigare Fud-program.

Kapslarna i Prototypförvaret är försedda med värmare för att simulera resteffekt från det använda kärnbränslet. Försöket har utformats för att kunna studera kopplade processer på ett sätt som inte är möjligt i mer specialiserade försök och den stora skalan innebär att rand- samt uppskalningseffekter blir betydelsefulla. När försöket installerades, under perioden 2001–2003, kunde deponerings- och installationstekniker testas under verklighetsnära förhållanden. Detta innebar att SKB även kunde visa att det är möjligt att uppföra slutförvaret. Enligt de ursprungliga planerna avsågs Prototypförvaret att vara i drift i upp till 20 år så att resultat från försöket kunde utgöra underlag för Kärnbränsleförvarets drifttillstånd. Figur 4-1 visar foton från installationen där komponenternas och installationsutrustningens storlek framgår.

Den kvarvarande inre sektionen består av fyra deponeringshåll med kapslar och totalt omkring 80 ton buffert. Deponeringstunneln är 40 meter lång och återfylld med mer än 1 000 ton återfyllning av typen 30/70 (andel bentonit/krossat berg). Brytning och provtagningar kommer att pågå under närmare två år och efterföljs av en analys- och modelleringsfas. Eftersom nuvarande referensutformning utgår ifrån ett annat material som återfyllning i deponeringstunnlarna, en ren bentonitprodukt, kommer mindre betydelse läggas vid att utvärdera återfyllningens status. Eftersom återfyllningen är del av det integrerade systemet kommer vissa insatser ändå göras för att förstå hur den utvecklats och integrerats med andra delar i systemet (exempelvis som mekaniskt mothåll till den svällande bufferten).

Ett av de övergripande målen med försöket är att bekräfta att systemet fungerar som avsett och att utvecklingen kan förstås med de modeller och verktyg som används vid modellering av säkerhet efter förslutning. I detta arbete ingår även att förstå de skillnader som finns mellan det installerade systemet (som exempelvis baseras på 30/70 återfyllning) och dagens referensutformning.



Figur 4-1. Foton från Prototypförvarets installation tidigt 2000-tal. Till vänster, en kapsel som placeras i ett deponeringshål. Till höger, ett buffertblock som ska placeras i ett deponeringshål.

För att på bästa sätt stödja resonemang i en kommande säkerhetsredovisning, kommer genomförandet och redovisningen av analysarbetet att till stora delar struktureras på liknande sätt som relevanta delar av referensutvecklingen i analysen av säkerhet efter förslutning i PSAR.

Minican

Försöket Minican installerades 2007 och innehåller fem miniatyrkapslar som är 31 centimeter långa och har en diameter på 14,5 centimeter. De har installerats i nästan horisontella borrhål på 450 meters djup i berget. Kopparkvaliteten i kapslarna är densamma som för kapslarna till Kärnbränsleförvaret. Fyra av de fem kapslarna har monterats i paket tillsammans med bentonitlera. Hos tre av paketen har leran låg täthet, medan den fjärde hade bentonit med hög täthet. Variationen i lerans förekomst och täthet ger möjligheter att studera just lerans funktion för kapseln. Med hjälp av mätinstrument och regelbunden vattenprovtagning har en rad parametrar mätts under försökets gång, till exempel grundvattenkemi, mikrobiologi, redox-potential, pH, korrosionshastigheter och dragspänningar i kapselmaterialet.

Två experimentkapslar från Minican-försöket finns fortfarande kvar nere i berget. Dessa kommer att tas upp under Fud-perioden, då efter drygt 15 år i berget. Kapslarna som är kvar har lågkompakterad bentonit runt sig och liknar mest den kapseln som togs upp 2010.

Long-term test of buffer materials

Bränslets radioaktiva sönderfall kommer att höja temperaturen i förvaret vilket tillsammans med upptag av grundvatten förväntas orsaka mindre mineralogiska förändringar i bentoniten. Long-term test of buffer materials (LOT) syftar till att identifiera och kvantifiera sådana mineralogiska förändringar i bentoniten som kan tänkas uppkomma till följd av exponering för en förvarsliknande miljö. Dessutom undersöks relaterade processer i bentoniten som rör kopparkorrosion, diffusion av katjoner samt överlevnad och aktivitet hos bakterier. Totalt installerades sju försökspaket, vilka innehåller ett centralt cirka fyra meter långt kopparrör omgivet av cylinderringar av kompakterad bentonit. En elektrisk värmare inne i kopparröret används för att simulera resteffekten från det använda kärnbränslet. Temperatur, totaltryck, vattentryck och fuktighet mäts via givare som placerats i bentoniten.

Tre av försökspaken (S1 till S3) har varit utsatta för typiska KBS-3-förhållanden med en maximal temperatur som understiger 100 °C, och fyra försökspaket (A0 till A3) har varit utsatta för speciellt ogynnsamma förhållanden, framför allt förhöjd temperatur till maximalt cirka 140 °C. Sex av paketen har återtagits och bentonitleran har analyserats grundligt, vilket har redovisats i ett flertal rapporter. De två senaste, S2 och A3, återtogs 2019 och utvärderades bland annat av Johansson et al. (2020). Paket S3 återstår och kommer att brytas under Fud-perioden, efter att försöket pågått i cirka 25 år.

Alternative buffer materials

Försöken Alternative buffer materials (ABM) är liksom LOT-försöken konstruerade för att studera långsiktig stabilitet av bentonitbufferten. De största skillnaderna till i ABM är ett stort antal olika bentonitleror inkluderade (istället för bara MX80) och värmaren är av stål istället för av koppar. I övrigt är designen snarlik LOT och måltemperaturen i ABM har varit cirka 130 °C, med undantaget av ABM5 som avsiktligt var betydligt varmare. ABM-försöken avslutas under Fud-perioden och beskrivs mer i detalj i avsnitt 10.3.5.

Concrete and Clay

De första experimentpaketen inom projekt Concrete and Clay installerades i Äspölaboratoriet under 2010 (Mårtensson 2015) och sedan dess har ytterligare provkroppar installerats. Flera återtag och analyser har genomförts. Projektets huvudsyfte har varit att under realistiska slutförvarsbetingelser studera interaktioner mellan de olika typer av material som kan förekomma i slutförvar för låg- och medelaktivt avfall. Det inkluderar studier av interaktioner mellan såväl olika barriärmaterial som mellan barriärer och materialprover representativa för låg- och medelaktivt avfall.

Genomförandet av detta projekt motiveras av ett behov av studier under relevanta förvarsbetingelser som ett komplement till de ofta accelererade laboratoriestudier, som utgör en majoritet av det underlag som används inom säkerhetsanalysarbetet. Resultat från analys av återtagna prover har även utgjort underlag vid utformning av kompletterande laboratorieexperiment för ökad processförståelse. Återtag av de sista kvarvarande provkropparna planeras under Fud-perioden. Delprojekt som ingår inom projekt Concrete and Clay redovisas mer utförligt i avsnitt 9.1.3.

Långtidsutveckling av återfyllningsmaterial för SFR

Det pågår ett långtidsförsök med makadamåterfyllning i SFR-liknande förhållanden med syftet att studera hur dess egenskaper påverkas över tid av mikrobiell tillväxt. Försöket pågår sedan 2020 och kommer att slutföras under Fud-perioden, se vidare beskrivning i avsnitt 9.1.7.

4.10.2 Nya fältförsök

Ett mindre antal nya och korta försök i berglaboratoriet kommer att genomföras under Fud-perioden. De handlar dels om buffertens tidiga utveckling i deponeringshålet under påverkan av grundvatteninflöde och värme från en fullskalig kapsel, dels om fortsatta utvärderingar av konceptuell installations-teknik för buffert och återfyllning.

4.11 Övervakning under uppförande och drift

4.11.1 Övervakningsprogram

SKB kommer att ta fram ett övervakningsprogram inför uppförande av Kärnbränsleförvaret. Programmet syftar till att ge en samlad bild av planerade övervakningsaktiviteter under uppförande och drift av slutförvaret. Det beskriver vilka data som ska samlas in och vad dessa ska användas till. Den information som samlas kommer att ge underlag till

- analysen av säkerhet efter förslutning,
- utformning och uppförande av slutförvarsanläggningen,
- kontroller av den yttre miljön.

Vad gäller underlag till andra och tredje punkten så har SKB tidigare bedrivit arbete inom området. I övervakningsprogrammet kommer detta arbete att summeras och relationen till andra typer av övervakning beskrivas.

Bedömningen av säkerhet efter förslutning bygger på förståelsen för de termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och biologiska processer som styr slutförvarens utveckling. Den utgör underlag för att demonstrera förvarets förmåga att innesluta eller fördröja spridningen av radioaktiva ämnen och för verifiering av att de installerade barriärerna, tunnlar och bergrum uppfyller de tekniska utformningskraven.

Det dataunderlag som SKB har byggt upp genom årtionden av forskning, kommer att kompletteras med resultat från ett detaljundersökningsprogram anpassat till de specifika förhållandena på den valda platsen. För verifieringen av att de tekniska utformningskraven uppfylls, kommer metoder och rutiner för att säkerställa detta att utvecklas. Detta kommer att utgöra ett verktyg för att identifiera tillverknings- eller installationsfel samt andra avvikelser i material, utrustning och hantering. Övervakningen kommer att bidra till att

- verifiera SKB:s förståelse för förvarets utveckling,
- stödja antaganden gjorda i analysen av säkerhet efter förslutning,
- identifiera eventuella tidigare okända processer och händelser.

Slutförvarens säkerhet bygger på passiva barriärer och övervakningen får inte påverka dessa negativt. Att införa övervakningsutrustning i en barriär kan innebära en risk för säkerheten efter förslutning. Detta begränsar valet av teknik, placering och tidsramar för att utföra övervakningen. Risker för bortfall av eller felaktiga signaler från givare i de tekniska barriärerna, är också en anledning till att sådana inte kommer att användas. Felaktiga signaler skulle kunna leda till ogrundade beslut om åtgärder som kan innebära stora kostnader och radiologiska risker.

Det finns andra möjligheter till övervakning som ger relevant information om barriärernas utveckling vid förvaringsplatsen, men som inte äventyrar säkerheten. En sådan som övervägs är, att i Kärnbränsleförvaret installera långtidsförsök nere i berget vid representativa platser i förvaret. Fokus skulle vara på de viktigaste aspekterna hos de tekniska barriärerna och försök kan brytas och utvärderas under driftperioden och inför förslutning för att ge underlag till och förtroende för beslutet att stänga och försluta förvaret.

Övervakningsprogram för Kärnbränsleförvaret kommer att tas fram och lämnas till SSM som ett underlag till ansökan om att påbörja uppförandet. Där kommer parametrar och försök som är lämpliga att övervakas identifieras och deras relevans för säkerhet efter förslutning förklaras. Vidare ska kvalitativa beskrivningar av förväntad utveckling göras. Resonemang om vilken typ av åtgärder som kan vidtas för att hantera eventuella situationer där resultat avviker från förväntningarna redovisas. Övervakning för att stödja analysen av säkerhet efter förslutning planeras inom följande områden:

- Hydrologi.
- Grundvattenkemi.
- Bergets mekaniska och termiska beteende.
- Cementbaserade material, lerbarriärer och förslutning.
- Kopparkorrosion.

4.11.2 Internationell utveckling

SKB följer också internationellt arbete inom övervakning och har varit och är fortsatt engagerat genom deltagande i EU-projektet Modern2020 och efterföljande delprojekt MODATS som drivs inom European Joint Programme on Radioactive Waste Management (Eurad, <https://www.ejp-eurad.eu/>).

Modern2020, som slutfördes under 2019, hade flera huvudsyften. Ett var att förfina metoder och ge vägledning för utveckling av övervakningsprogram inklusive konstruktionsförutsättningar, strategier för övervakning samt en process för beslutsfattande med övervakningsdata som underlag. Ett annat syfte var att forska om och utveckla övervakningsteknologi avseende sensorer, signal- och energiöverföring samt icke-intrusiva övervakningsmetoder. Ytterligare ett syfte var att förfina olika metoder för en effektiv dialog med allmänheten och lokala intressenter i ett tidigt skede av utvecklingen av övervakningssystem. Dessa syften uppfylldes till viss del och genererade underlag för bland annat fortsatt arbete i till exempel MODATS.

Ambitionen i MODATS är att konsolidera strategier för implementering av övervakningssystem genom att utveckla metoder som kan stödja tilltro till insamlade data och därmed gagna implementeringen för slutförvaren. För att utveckla denna ambition utförs forskning och utveckling avseende datainhämtning, hantering och redovisning samt dess utnyttjande som underlag för förståelse av systemet. Dessutom bedrivs även forskning och utveckling avseende ny teknik för övervakning av ingenjörbarriärer.

4.12 Avveckling

Avveckling av kärnkraftverk pågår eller planeras för, på flertalet av de svenska kärnkraftsanläggningarna. Utvecklingsområdena är till stor del gemensamma för tillståndshavarna och relaterar mer till att få fastställda förutsättningar för avfallshandling och avbördningsvägar, än till grundforskning och ren teknikutveckling, även om anpassningar av tillgänglig teknik kommer att behövas. Utmaningar kring avfallshandling handlar bland annat om att ta fram och utveckla acceptanskriterier för kommande slutförvar, att få god kännedom om det avfall som uppstår avseende innehåll av radionuklider och material samt att fastställa godkända avfallsbehållare för långlivat avfall till planerat slutförvar. Frågor som rör avfall och avfallshandling beskrivs mer utförligt i kapitel 6. I del III beskrivs planerade aktiviteter som kopplar till avveckling och avvecklingsplanering.

4.13 Övriga områden

SKB följer utvecklingen inom ett par andra områden som inte direkt kopplar till utveckling av just SKB:s slutförvar, men som är av intresse för verksamheten. Frågeställningar kring bevarande av information och kunskap genom generationer och utvecklingen inom andra metoder för slutförvaring är sådan områden.

4.13.1 Bevarande av information och kunskap genom generationer

SKB har under många år arbetat med frågeställningar kring arkivering och bevarande av kunskap och information om slutförvaren, både under deras drifttid som omfattar ett par generationer och på betydligt längre sikt efter deras förslutning. Syftet med arbetet har varit att försöka skapa så goda förutsättningar som möjligt att bevara väsentlig information.

I sitt beslut om tillstånd till KBS-3-systemet i januari 2022 skriver regeringen att frågan om kunskaps- och informationsöverföring är en viktig del i den fortsatta stegvisa tillståndsprocessen och att den utgör en del av Fud-programmet. Frågan har varit aktuell genom hela tillståndsprocessen för KBS-3-systemet och SKB avser att även fortsättningsvis följa utvecklingen och redovisa sitt arbete kring frågan i Fud-programmet.

Frågorna om bevarande av information och kunskap till kommande generationer kan tyckas som mest angelägna för Kärnbränsleförvaret, men behöver även beaktas för SFR och SFL. Rent praktiskt behöver lösningarna för bevarandet av information om förvarens existens finnas på plats först i samband med att ett slutförvar försluts, vilket kan ske först under slutet av detta sekel. Det är inte möjligt, för vare sig SKB, myndigheter eller andra delar av samhället, att idag definitivt bestämma hur man ska gå tillväga med något som ska ske så långt fram i tiden. Dock behöver SKB redan under uppförandet av slutförvaren ta fram strategier för det egna arbetet med bevarande av data och information om förvaren och dess innehåll fram till förslutning.

I det dagliga arbetet och fram till förslutningen av slutförvaren, förvaltar och bevarar SKB dokument, data och information i enlighet med externa krav från SSM och Riksarkivet. Vissa av dessa krav innebär förvaring utan tydligt slutdatum. Enligt SSM:s föreskrifter om arkivering vid kärntekniska anläggningar, SSMFS 2008:38, ska ett slutförvars samlade arkiv, ordnade och förtecknade, överlämnas till Riks- eller landsarkiv om verksamheten upphör. Det strukturerade arbetssätt som SKB tillämpar idag vad gäller förvaltning och bevarande av dokument, data och information inom ramen för ordinarie arbete med säkerhetsredovisningar är en central och värdefull utgångspunkt för den framtida bedömningen och valet av vilken information som behöver bevaras efter förslutning. Arbetet styrs redan via befintliga data- och informationshanteringsplaner enligt SKB:s ledningssystem och avses kompletteras med arbetssätt för sortering och märkning kopplat till bevarandestatus (fram till eller efter förslutning). Rutiner för hantering av dokumentation rörande vägval av teknik, strategier, arbetssätt planeras vidareutvecklas inför byggstart av Kärnbränsleförvaret. Även rutinerna för hantering av fysiska prover och bildmaterial planeras att utvecklas på likande sätt som de för dokument.

SKB anser att det är betydelsefullt att ha ett arbetssätt som syftar till att hålla frågan levande, utveckla strategier samt sprida kunskapen om behovet. En förutsättning för att lyckas är utöver, SKB:s medverkan, engagemang från berörda myndigheter och kommuner såväl som samhället i övrigt. SKB har tidigare

deltagit i de internationella initiativen Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M) och Assembling Alternative Futures for Heritage, vilka presenterades i Fud-program 2019. Slutrapporten från OECD/NEA:s arbete RK&M publicerades 2019 (OECD NEA 2019) och pekade på en bevarandestrategi som involverar flera olika metoder som är verksamma på olika tidskalor, består av olika medium och innehåll, använder sig av olika överföringsmetoder, involverar olika aktörer samt förläggs till flera olika platser. Att välja en diversifierad bevarandestrategi anses ge förutsättningar för informations- och kunskapsbevarande över generationer.

Informationsbevarande är inte enbart en fråga för det kärntekniska området. Behoven är likartade även för andra typer av farligt avfall och förorenade områden och är dessutom en gemensam internationell angelägenhet. Utifrån detta kommer SKB att under slutförvarens drifttid fortsätta delta i nationella och internationella forum och arbetsgrupper där dessa frågor adresseras. Syftet är att ha kännedom om det aktuella kunskapsläget, bidra till att ändamålsenliga principer, metoder och verktyg utvecklas liksom att lämpliga insatser vidtas. Erhållna erfarenheter kommer löpande avrapportera till intresserade parter. Med utgångspunkt från detta och den avrapportering som SSM gjorde hösten 2021 till regeringen i form av ”Metoder för överföring av information och kunskap om slutförvaret för radioaktivt avfall” (SSM 2021d), planerar SKB för fortsatt hantering av frågan. I det planeringsarbetet kommer både kommande forskningsbehov och internt arbete belysas liksom informationsbevarandets koppling till bränsleinformation och förebyggandet av oavsiktligt intrång.

Våren 2021 påbörjades ett tvåårigt forskningsprojekt vid Linköpings universitet delvis finansierat av SKB, med metodutveckling och skrivande av en så kallad KIF (Key Information File, som föreslogs i slutrapporten från RK&M) för Kärnbränsleförvaret.

Projektet Minne bortom generationer

En förstudie inför ett planerat projekt, Minne bortom generationer genomfördes 2019. Syftet med förstudien var att ta fram ett förslag till ett projekt med målet att föreslå och genomföra praktiska exempel på lösningar på utmaningen att bevara kunskap och information om farligt avfall över generationer genom samverkan med kulturarvssektorer. Förutom SKB deltog Linnéuniversitetet (initiativtagare och sammanhållande koordinator), Östhammars kommun, SSM och Riksarkivet med flera. Förstudien finansierades av Vinnova, men tyvärr gavs inte medel för att starta det föreslagna projektet. Arbetet med förstudien lade grunden för en fruktbar samverkan mellan olika nationella intressenter. Under våren 2022 återsamlades gruppen för att titta på möjligheten att återuppta arbetet samt möjlig finansiering. Det resulterade i att bland andra SKB medverkar i en ansökan från Linnéuniversitetet om medel från Formas för ett tvåårigt projekt – Förändring för alltid: hållbart långtidsminne om slutförvaren för kärnavfall. Beslut om eventuell medelstilledning kommer i november 2022.

Information, Data and Knowledge Management

Under 2018 avslutades tre projekt som funnits inom ramen för NEA:s Radioactive Waste Management Committee (RWMC) med kopplingar till bevarandet av kunskap och information om slutförvar för radioaktivt avfall. SKB deltog aktivt i två: Radioactive Waste Repository Metadata Management (RepMet) och RK&M. Det tredje var Expert Group on Waste Inventorying and Reporting Methodology (EGIRM). NEA lanserade en fortsättning på de tre projekten under ett gemensamt paraply – Information, Data and Knowledge Management (IDKM), med fyra arbetsgrupper: Knowledge Management, Archiving, Safety Case och Awareness Preservation.

SKB har sedan början deltagit i arbetsgruppen Awareness Preservation som utgör en fortsättning på RK&M. Syftet för SKB:s deltagande är att fortsätta dela erfarenheter om och utveckla idéer kring praktiskt genomförande av förberedelser för att bevara kunskap och information om slutförvar för använt kärnbränsle och radioaktivt avfall och utforska förslag på lösningar som inte hanns med innan RK&M avslutades. Exempel på frågor som föreslås fördjupas är etiska aspekter på IDKM, möjligheter att utnyttja internet över generationer och förutsättningar för att använda olika typer av tidskapslar. Sedan våren 2022 deltar SKB även i arbetsgruppen om Knowledge Management.

4.13.2 Andra metoder för slutförvaring

Frågor om utvecklingen av andra metoder för slutförvaring, speciellt deponering av använt kärnbränsle i djupa borrhål har varit återkommande under många år av samråd och tillståndsprövning för inkapslingsanläggningen och Kärnbränsleförvaret. Sedan Fud-program 2019 har inget framkommit som ger anledning att omvärdera att den mest realistiska strategin för slutligt omhändertagande av det använda kärnbränslet som avfall är geologisk deponering. I regeringsbeslutet om tillstånd för KBS-3-systemet slår regeringen fast att alternativ till KBS-3-metoden endast finns på konceptuell nivå och att det idag därför inte finns någon annan metod som skulle kunna utgöra BAT. SKB fortsätter att bevaka utvecklingen av andra metoder för slutförvaring av radioaktivt avfall med syfte att ta till sig ny kunskap för att i framtiden ytterligare kunna optimera sina slutförvar. Ett exempel på utvecklingar som SKB avser följa är Swedish Scientific Drilling Program (www.ssdp.se) för att därigenom få del av de data och andra resultat som är relevanta för SKB:s arbete. SKB planerar dock inte att bedriva någon egen forskning eller utveckling på området.

5 Arbetssätt, kompetens och resurser

För att kunna ta hand om radioaktivt avfall och använt kärnbränsle på ett säkert och kostnadseffektivt sätt har SKB ett systematiskt arbetssätt för genomförandet av den forskning, utveckling och demonstration som behövs för att kunna uppföra och ta i drift de nya anläggningarna. För anläggningar i drift gäller SSM:s föreskrifter och hur dessa tillämpas avseende arbetssätt, resurser och kompetens redovisas inte här. Kapitlet fokuserar på den iterativa processen att utveckla, implementera och utvärdera slutförvar för radioaktivt avfall, vilket innefattar forskning och teknikutveckling samt utvärdering av säkerhet under drift och efter förslutning. Här beskrivs även översiktligt hur SKB tillförsäkrar sig att den kompetens, de resurser och de verktyg som behövs finns tillgängliga.

SKB:s arbetssätt för att genomföra forskning, utveckling och demonstration utvecklas successivt, men redovisningen i detta kapitel följer i huvudsak motsvarande kapitel i Fud-program 2019. Hantering av organisation, resurser och kompetens i anslutning till utvecklingen av kärnkraftsreaktorerna hanteras i första hand av reaktorinnehavarna och beskrivs i avsnitt 14.4.

5.1 Fud-programmets roll för öppenhet och insyn

KTL reglerar Fud-programmets periodicitet och innehåll. Fud-program 2022 är det 17:e i ordningen och SKB kan konstatera att Fud-processen utgör en viktig del av den kontinuerliga kunskapsuppbyggnaden och de successiva vägval som görs för frågor kring utveckling av slutförvarssystem. Universitet/högskolor, miljögrupper, kommuner och samhället i övrigt följer Fud-processen och har genom denna påverkat utvecklingen av kärnavfallsprogrammet under de decennier som passerat. Fud-programmet, och processen kring detta, har medverkat till öppenhet och insyn i forsknings- och utvecklingsfrågor för de slutförvarssystem tillståndshavarna ansvarar för att, genom SKB, implementera. Det gäller för kunskapsläget i stort såväl som för planer och program. Regeringen konstaterar också avseende Fud-program 2019 att "...SKB ger en tydlig överblick och förståelse för bolagets och reaktorägarnas planer och medger den öppenhet och insyn i planer och program som lagstiftningen syftar till."

Några av de ursprungliga förutsättningarna för Fud-processen har förändrats under de år som gått sedan KTL tillkom. I de senaste Fud-programmen har SKB haft ambitionen att undvika dubbel redovisning och inte föregripa yttranden, över SKB:s ansökningar i de pågående tillståndsprövningarna för KBS-3 och SFR-utbyggnaden, i samband med granskning och utvärdering av programmen. Det är SKB:s uppfattning att fokus flyttas och omfattningen av Fud-programmet minskar när planerade anläggningar övergår till tillståndsgivna anläggningar under tillsyn av SSM. Detta samtidigt som redovisningen ska innehålla en översikt av alla aktiviteter och verksamheter nödvändiga för att ge en tillräcklig förståelse för helheten.

Regeringen återkopplar vidare angående Fud-program 2019 med att "Reaktorinnehavarna och SKB ska beakta hur Fud-programmet bättre kan bidra till öppenhet och insyn i hur arbetet med forskning, teknikutveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall bedrivs."

I Fud-program 2022 presenterar SKB ett mer systemövergripande perspektiv för att tydliggöra relationer mellan olika aktiviteter och milstolpar för de olika anläggningarna samt också behov av att fortsatt forskning och utveckling relateras till kommande milstolpar. SKB vill i sammanhanget även precisera den process som genomförs i samband med inlämnande av Fud-programmet och som successivt utvecklas. Förutom redovisning vid ett större seminarium för remissinstanser av Fud-program 2022, arrangerat av SSM, genomför SKB dialog med granskningsgruppen inom SSM. Information till, och dialog med, kommunerna om programmet genomförs också i samband med utgivande. SKB har därutöver för avsikt att hålla en temakväll om Fud för allmänhet och intresserade i berörda kommuner.

SKB publicerar löpande relevanta resultat från forskning, teknikutveckling och demonstration i vetenskapliga och andra tidskrifter och uppmuntrar egen personal, forskningsinstitutioner och konsulter som SKB samarbetar med, till att publicera. SKB:s resultat presenteras och diskuteras även öppet på vetenskapliga konferenser och redovisas i konferensdokumentationen. Det internationella

samarbetet har haft och har en särskild betydelse för att pröva resultat av experiment och analyser i en konstruktiv teknisk och vetenskaplig anda. Utbytet är också en återkommande källa för nya idéer och uppslag för fortsatt arbete.

SKB arbetar även för att sprida forskningsresultat utanför vetenskapsvärlden, se avsnitt 5.2.3.

5.2 Forskning

Målet för SKB:s forskningsprogram är att säkerställa tillgången till den kunskap som behövs för att utforma, lokalisera, få tillstånd för, projektera, uppföra, driva, avveckla och försluta planerade anläggningar samt för att bibehålla en säker drift av SKB:s befintliga anläggningar. Det innebär att forskningsverksamheten ska

- ge tillräcklig kunskap om säkerheten efter förslutning och möjliggöra att säkerheten även i framtiden kan analyseras för SKB:s befintliga och planerade anläggningar,
- ge tillräckligt underlag för den fortsatta teknikutveckling och projektering som behövs för att åstadkomma effektiva och optimerade lösningar som samtidigt ger säkerhet både under drift och efter förslutning av SKB:s slutförvar.

5.2.1 Styrning av forskning

Inriktningen av SKB:s forskningsprogram läggs fast i de Fud-program som i enlighet med KTL inges till SSM vart tredje år. SKB har ett forskningsråd med representation från olika delar av verksamheten för att stödja forskningen och bistå i prioritering av forskningen.

I samband med den årliga verksamhetsplaneringen genomför ansvariga för de olika ämnesområden som ingår i säkerhetsanalyserna en genomgång av nya, pågående och avslutade forskningsfrågor, med noggrann detaljering av planerna för de kommande åren. På så sätt sker en regelbunden genomgång och uppföljning av det fastställda forskningsprogrammet. Som en del i processen att uppdatera SKB:s Fud-program genomförs forskningsseminarier, där SKB:s experter inom olika ämnesområden föredrar sina förslag till planer, inklusive bedömt resursbehov, för de närmaste åren för forskningsrådet och övriga intressenter inom SKB. Forskningsrådet och SKB:s beställare av forskning får genom föredragningarna en överblick av forskningsbehoven och gör en samlad bedömning av behoven av insatser under de närmaste åren. Denna bedömning ligger sedan till grund för verksamhetsplaneringen och utgör ett viktigt underlag i arbetet med kommande Fud-program.

5.2.2 Forskningens framtida inriktning

Syftet med förvaren är att långsiktigt skydda människor och miljön från radiologiska skadeverkningar av avfallet, och säkerheten efter förslutning är därför central för utformning, lokalisering, uppförande och drift av förvaren. Formellt avgörs om ett förvar har en acceptabel grad av säkerhet genom att myndigheter bedömer SKB:s analyser av säkerhet efter förslutning. Allt SKB:s arbete inom detta område har dock sin grund i att SKB självt måste skaffa sig en övertygelse om att föreslagna förvarskoncept är säkra på lång sikt. SKB:s forskningsprogram drivs därför i hög grad utifrån behovet av att analysera förvarens säkerhet efter förslutning. En viktig del i varje analys av säkerheten efter förslutning är utvärderingen av kunskapsunderlaget, både för processer och för ingående data i analysen. Sådana utvärderingar har ingått i de senaste säkerhetsanalyserna SR-Site för Kärnbränsleförvaret, SR-PSU för det utbyggda SFR samt säkerhetsvärderingen av SFL. Resultaten av dessa utvärderingar samt granskningen av SKB:s tillståndsansökningar ligger väsentligen till grund för forskningsinsatserna som planeras i detta Fud-program.

De framtida forskningsinsatser som nu behövs rör i första hand SKB:s befintliga och planerade slutförvar för radioaktivt avfall och använt kärnbränsle (SFR, Kärnbränsleförvaret och SFL). I och med att uppförandet av de nya anläggningarna påbörjas, flyttas fokus i arbetet från forskning och principlösningar till teknikutveckling av kvalitetsstyrda industrialiserade system. Forskningsinsatser och säkerhetsvärderingar kommer dock att behövas som stöd till teknikutvecklingen och då särskilt för framtagandet av praktiskt användbara konstruktionsförutsättningar (krav) på slutförvaren samt för att kunna verifiera att framtagna tekniska lösningar uppfyller dessa krav.

Även om det idag finns en omfattande kunskap inom alla de områden som är av betydelse för säkerheten efter förslutning, kan man förvänta sig att nya frågor tillkommer. Ursprunget till frågor som kan komma att kräva forskningsinsatser är av flera slag:

- Internt hos SKB vid utveckling av förvarskoncept och i samband med genomförande av analyser av säkerheten under drift och efter förslutning. Även platsundersökningar kan generera nya frågor och i takt med att en plats undersöks alltmer i detalj. Nya eller förändrade avfallstyper kan också leda till nya frågor.
- Omvärlden, till exempel inom det vetenskapliga samfundet och i SKB:s systerorganisationer i andra länder.
- Från SSM och remissinstanser i samband med granskningar av Fud-program och underlag i tillståndsprövningar.
- Förändringar av omvärldskrav.

I SKB:s uppgift ingår även kunskapsbevakning av närliggande områden som kan ha betydelse för det svenska kärnavfallsprogrammet i framtiden. Det rör framför allt utvecklingen av metoder för behandling och slutförvaring av radioaktivt avfall. Detta sker i huvudsak genom upprätthållande av internationella kontakter och genom att följa branschtidskrifter.

5.2.3 Granskning, öppenhet och insyn

SKB:s forskningsarbete bedrivs utifrån kravet att resultaten ska vara korrekta, spårbara, reproducerbara och relevanta för SKB:s uppdrag. För att uppnå detta har SKB utvecklat och tillämpar rutiner för kvalitetssäkring av genomförande av forskningsprojekt och uppdrag. Det finns även särskilda rutiner för kvalitetssäkring av säkerhetsanalyser och dessa rutiner innefattar godkännande av forskningsresultat, data och modeller för användning i analysen, se även avsnitt 5.5.4.

Grundprincipen är att SKB:s forskningsresultat ska publiceras i öppen litteratur för att extern granskning ska underlättas. Forskningsresultat har sedan forskningsprogrammet inleddes på 1970-talet publicerats, och kommer även fortsättningsvis att publiceras i SKB:s rapportserier som är tillgängliga via SKB:s webbplats. Innan de publiceras har rapporterna genomgått intern och/eller extern granskning i enlighet med fastställda rutiner. Kvalitetssäkrade data från SKB:s platsundersökningar, teknikutveckling och forskning sparas i databaser och är tillgängliga för myndigheterna i deras granskning.

SKB strävar även efter att publicera relevanta resultat i vetenskapliga tidskrifter och uppmuntrar egen personal, forskningsinstitutioner och konsulter som SKB samarbetar med, till att publicera. Resultaten genomgår då en oberoende granskning genom den "peer review" som sker innan publicering. SKB:s forskningsresultat presenteras och diskuteras även på vetenskapliga konferenser och redovisas i konferensdokumentationen (proceedings). Under åren 2019 till 2021 publicerade SKB:s medarbetare och forskare som är finansierade av SKB närmare 100 vetenskapliga artiklar och drygt 20 andra publikationer (böcker och konferensbidrag).

Utöver att själva publicera eller finansiera forskning har SKB delat med sig av data till andra forskare/institut som efterfrågat det för sin forskning. Exempel på detta är att data från SKB:s forskning på Grönland som finns tillgänglig i öppna databaser, kemidata från Forsmarksområdet som har delats med SMHI och med Svealands kustvattenvårdsförbund och materialprover på koppar och bentonit som delats med andra forskarteam.

SKB arbetar även för att sprida forskningsresultat utanför vetenskapsvärlden, exempelvis genom publicering i populärvetenskapliga tidskrifter, publicering på SKB:s webbplats och i SKB:s tidning Lagerbladet, genomförande av temakvällar i Östhammars och Oskarshamn kommuner samt information på skolor och universitet. Medarbetare på SKB deltar också på olika branschdagar för att få och ge information inom sina specialområden (till exempel berg och betong).

5.3 Teknikutveckling

Målet med teknikutvecklingen är att se till att de processer, system och utrustningar som behövs för att omhänderta det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet finns tillgängliga när anläggningarna ska tas i drift. Hantering och slutförvaring av kärnavfallet ska ske på ett styrt, kontrollerat och rationellt sätt samtidigt som krav på säkerhet efter förslutning, låg stråldos vid drift av anläggningarna samt begränsad miljö- och klimatpåverkan uppfylls.

Teknikutvecklingen avser både fysiska objekt – till exempel för Kärnbränsleförvaret det använda kärnbränslet, tekniska barriärer, plugg i deponeringstunnel och bergutrymmen, och produktionslinjer med tillhörande processteg. Processtegen i sin tur omfattar i allmänhet någon form av produktionsprocess och någon form av mätprocess för att kvalitetssäkra produktionsprocessens utfall. I teknikutvecklingen ingår också att beskriva hur alla delarna samverkar med omgivningen det vill säga människor, teknik och organisation (MTO).

5.3.1 Bedömning av teknisk teknikmognad

Technology readiness levels (TRL) är ett arbetssätt för bedömning av mognadsgrad inom respektive teknikområde. TRL-metodiken bygger på en niogradig skala och används som stöd vid planering och prioritering av utvecklingsprojekt. TRL1 innebär att grundläggande funktionsbehov och möjliga tekniklösningar har identifierats. Den grundläggande teknikutvecklingen pågår till och med TRL6. Arbetet med att realisera och validera tekniken omfattar TRL7–8 och vid TRL9 har uppförande och provdrift genomförts enligt krav och förväntningar.

TRL-bedömningen görs av en grupp med samlad kompetens inom aktuellt teknikområde. Ansvarig teknikbeställare fastställer bedömningen.

5.3.2 Styrning av teknikutveckling

Styrningen av teknikutveckling utgår från en strategisk teknikutvecklingsplan. Till den knyts genomförandeplaner som syftar till att tydliggöra och motivera vilken teknikutveckling som behövs per slutförvarssystem, produktionslinje och teknikområde ända fram till driftsatt produktion. Genomförandeplanerna utgår från vad som behöver vara klart vid de milstolpar som identifierats för de olika anläggningsprogrammen som redovisas i kapitel 3.

Genomförandeplanerna beskriver vägen fram till att den grundläggande teknikutvecklingen är färdig (beslutad referensutformning, TRL6). Efterföljande realisering av utvald teknik och metoder (vidareutveckling/optimering, konstruktion och införande, TRL7) och slutligen de anpassade valideringsaktiviteter (TRL8) som behöver göras vid uppförandet (av bergutrymmen och betongbarriärer) eller inför provdriften av alla produktions- och mätprocesser, styrs via programplaner i enlighet med ledningssystemet.

Validering (TRL9) betraktas som genomförd i samband med godkännande av SAR för rutinmässig drift och att provdriftsfasen därmed avslutas.

Teknikutvecklingen beställs från de funktioner inom SKB som ansvarar för att uppföra de nya anläggningarna. Omfattningen av arbetet styrs övergripande av hur beprövad en teknik, metod eller utrustning är, det vill säga hur pass standardiserad den är.

Teknikutveckling och Fud-program

Vid framtagning av Fud-programmet görs en detaljerad genomgång av aktuell status på teknikutvecklings- och forskningsportföljerna. Det nya Fud-underlaget stäms av och kaliberaras mot verksamhetsplanerna, investeringsplanen och huvudtidplanen för de tillkommande anläggningarna.

Fud-program och verksamhetsplaner läggs fram för företagsledningen och SKB:s styrelse för beslut. Planerna stäms sedan av årligen mellan anläggningsprogrammen, beställarna för teknikutveckling och de funktioner inom SKB som genomför själva utvecklingsarbetet.

5.3.3 Teknikutvecklingsprocess

SKB har en övergripande systematik för utveckling av produktionslinjer inkluderat teknisk utrustning och metoder som används och som utgår från SKB:s ledningssystem. Målet med systematiken är att skapa förutsättningar för att identifiera, planera och genomföra alla de detaljerade aktiviteter och åtgärder som krävs för att det uppförda slutförvaret ska kunna drivas på ett sådant sätt att alla tillämpliga krav på de tekniska barriärerna och bergutrymmen, inklusive de som berör säkerheten efter förslutning, uppfylls.

Processen för styrning av teknikutveckling börjar med idéer om olika koncept och slutar med att system och metoder tas i drift i aktuell anläggning. Den delas in i följande faser:

- Utveckla konceptförslag (kravbild och funktionalitet).
- Utveckla konceptbeskrivning (detaljer, simulering och validering i laboratoriemiljö).
- Utveckla referensutformning (demonstration och utvärdering).
- Realisera teknisk lösning (detaljkonstruktion, optimering och införande).
- Validering och kvalificering (samfunktion av processer).
- Verifiering av kravuppfyllnad.

Initialt sker utvecklingen med stort fokus på säkerheten efter förslutning då sådan kravuppfyllnad är det huvudsakliga målet för utvecklingen. Andra kravområden behöver dock också beaktas för att sammantaget säkerställa en robust anläggning som är möjlig att driva effektivt samtidigt som den producerar ett acceptabelt slutförvar. Exempel på andra kravområden är god säkerhet och arbetsmiljö under drift, underhållsaspekter, anpassning till människans förmåga, låg påverkan på yttre miljö samt rimliga investerings- och livscykelkostnader.

För varje utvecklingsfas för respektive produkt eller process, finns en övergripande styrning för vad som ska uppnås och således vilket underlag som ska finnas inför beslut om att gå vidare med nästa fas i utvecklingen.

Processen omfattar på en övergripande nivå vad som ska göras i respektive fas och vad som ska levereras. Genomförande av teknikutveckling (obeaktat fas och om arbetet spänner över en eller flera faser) beskrivs i SKB:s ledningssystem för styrning av uppdrag eller projekt.

Avgränsningen av ett projekt beslutas från fall till fall. Normalt löper inte ett projekt över flera faser utan det avgränsas till en viss teknikutvecklingsfas. För att hålla samman utvecklingsverksamheten, för till exempel en anläggning, kan projekten styras och samordnas av ett program som normalt sträcker sig över flera faser. Teknikutvecklingen är inte en fristående process. Teknikstyrande beslut beaktar de planerade anläggningarnas begränsningar för att åstadkomma väl fungerande produktionslinjer.

5.3.4 Gränssnitt mellan teknikutveckling och konstruktion

Teknikutvecklingsprocessen kan relateras till SKB:s konstruktionsstyrmodell som beskrivs i ledningssystemet och som tillämpas vid projektering av nya anläggningar. Konstruktionsstyrmodellen omfattar följande principiella faser:

- Anläggningskonfiguration.
- Anläggningskonstruktion.
- Systemkonstruktion.
- Detaljkonstruktion.
- Installation.
- Slutdokumentation.

Viktiga samband mellan teknikutvecklingsprocessen och konstruktionsstyrmodellen är att TRL6 (beslutad referensutformning) överensstämmer med avslutningen på fasen systemkonstruktion, det vill säga leverans av detaljkonstruktionsunderlagen. Därefter genomförs teknikrealisering (TRL7-8) inkluderat utprovning av installation, genomförande av verifiering och validering enligt konstruktionsstyrmodellen med tillägg av kvalificering och vissa validerande samfunktionsprover.

5.3.5 Kvalitetssäkring, styrning och kontroll

Ett viktigt mål för teknikutvecklingen är att det ska gå att verifiera att de tekniska lösningar som tas fram uppfyller de krav som ställs. Med kvalitetssäkring, styrning och kontroll avses de åtgärder som behöver utföras för att säkerställa och ge tilltro till att de krav som ställs på anläggningarna under drift och efter förslutning av slutförvarsanläggningarna och på de färdigbyggda slutförvararna uppfylls. Erhållna resultat ska uppfylla de acceptabla värdena för egenskaper som bidrar till säkerhet och strålskydd.

SKB tillämpar en systematisk kravhantering som styrs av ledningssystemet. Författningar, tillstånd, villkor och interna krav identifieras och bryts ned till krav på anläggning, system och komponent så att de kan utgöra grund för verifiering och validering. Detta gäller såväl enskilda krav som samordning av dem så att olika krav kan uppfyllas som helhet. Krav som tillämpas ska vara relevanta, dokumenterade, kommunicerade och spårbara under alla faser av teknikutveckling för konstruktion, uppförande och drift av tillkommande anläggningar samt efter deras avveckling och förslutning. Ändrade eller nya krav kan uppkomma på grund av förändrade föreskrifter eller förändrade interna krav. Vid implementering av nya eller ändrade krav sker en värdering för att säkerställa att det inte blir en negativ påverkan på driften eller för säkerheten efter förslutning av slutförvararna, även om förändringen har annan grund än sådana som rör strålsäkerhet.

Den tekniska lösning som fastställs vid utvecklingsarbetet ska kunna produceras så att den färdiga produkten överensstämmer med den fastställda utformningen. Innan produktionen kan inledas ska de tillverkningsprocesser och provningsmetoder som SKB avser tillämpa, visas vara stabila. Mät- och produktionssystemens förmåga att åstadkomma och kvalitetssäkra fysiska objekt som överensstämmer med specifikation demonstreras i kvalificeringar. För att redovisa hur kvalitet uppnås och säkerställs, behövs en systematik och spårbarhet i hur SKB bekräftar att produktionen av slutförvar, och de delar som ingår i denna, uppnår tillräcklig kvalitet. Redovisning och godkännande av resultaten från teknikutvecklingen, inkluderat verifierande och validerande aktiviteter, är entydigt med en kvalificering av produktionslinjer.

Kvalificeringen av varje mät- och produktionssystem anpassas till den tillverkade eller provade delens betydelse för säkerheten efter förslutning, tillgänglig beprövad teknik, tillgängliga standarder och normer samt de förhållanden som kommer att råda, såväl fysiska som organisatoriska, vid genomförandet i den planerade produktionen. Det innebär att varje kvalificering är unik, där några i princip enbart pekar på de standarder och normer som ska tillämpas medan andra kräver omfattande analyser och genomförande av demonstrationer. SKB:s fortsatta arbete med att fastställa principer för kvalificeringsprocessen kommer att presenteras inom Clinks och Kärnbränsleförvarets preliminära säkerhetsredovisningar och deras beskrivningar av produktionslinjerna.

Det kommer även att genomföras provning och kontroller vid uppförandet av anläggningarna för att bekräfta att uppförandet fungerar som det ska och säkerställa att inga fel eller avvikelser kvarstår som har betydelse för säkerheten efter förslutning. Kontroller inordnas i kontrollprogram vars utformning och innehåll beror av vilken typ av krav som ska verifieras, till exempel kontrollprogram för yttre miljö, program för undersökningar av berg, program för bergteknisk kontroll och program för kontroll av arbetsmiljö.

5.4 SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration

SKB:s anläggningar för forskning, utveckling och demonstration innefattar Äspölaboratoriet, med en del under mark och tre anläggningar på markytan, och Kapsellaboratoriet. SKB planerar att vara klar med försöken i Äspölaboratoriets undermarksdel under innevarande Fud-period. Behovet av Äspölaboratoriets ovanmarksanläggningar kvarstår en bit in på 2030-talet.

5.4.1 Äspölaboratoriet

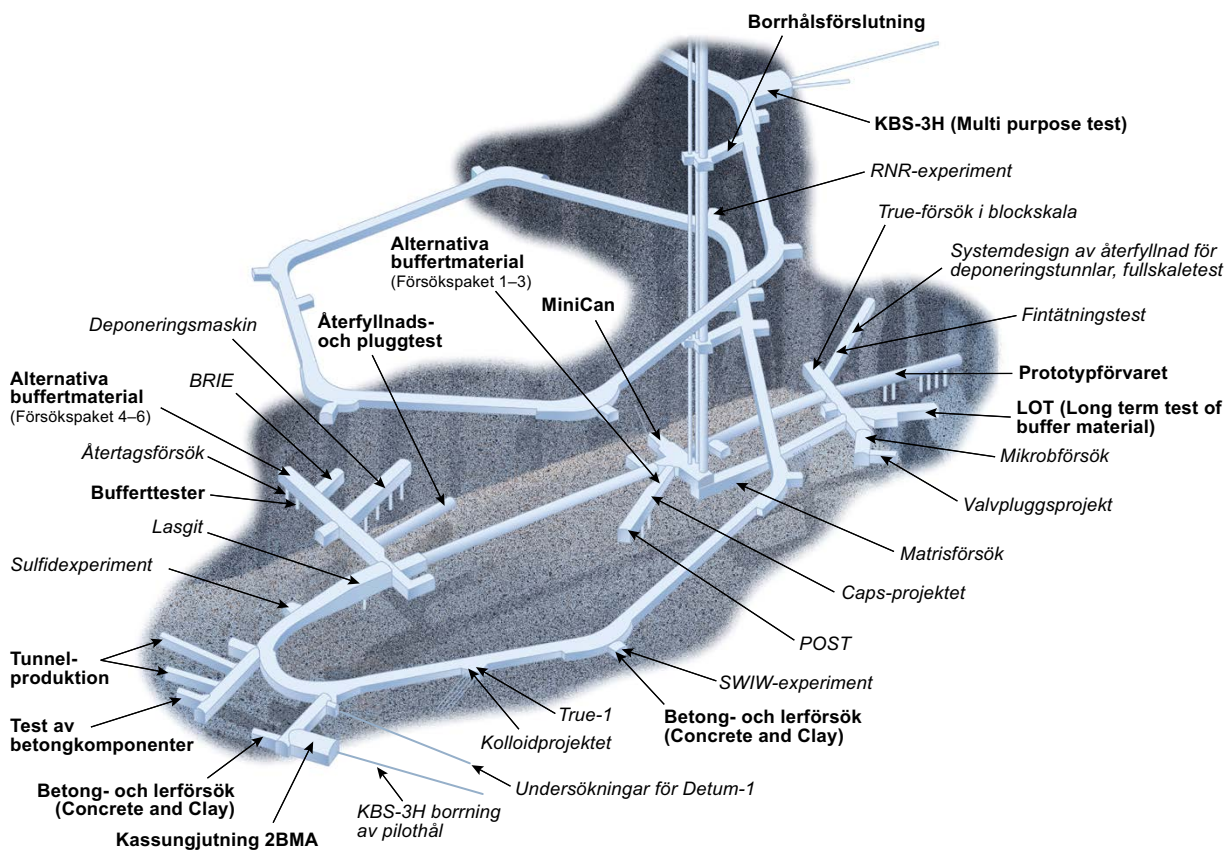
Äspölaboratoriet anlades under perioden 1990–1995 och verksamheten är en vidareutveckling av det arbete som tidigare bedrevs i Stripa gruva i Bergslagen. Laboratoriet är beläget på ön Äspö norr om Oskarshamns kärnkraftverk. Den under mark förlagda delen består av en tunnel från

Simpevarpshalvön, där Oskarshamns kärnkraftverk ligger, till södra delen av Äspö. Under Äspö fortsätter huvudtunneln i två spiralvarv ned till ett djup av 460 meter. De olika experimenten och demonstrationsförsöken äger rum i nischer och korta tunnlar som grenar ut från huvudtunneln. En illustration över laboratoriet visas i figur 5-1 och aktuella experiment redovisas i Äspölaboratoriets årsrapport (SKB TR-21-10).

Äspölaboratoriet har haft en central betydelse avseende utveckling, test och verifiering av teknik och metoder för de platsundersökningar som genomförts i Laxemar och Forsmark samt för genomförande av undersökningar under pågående byggnation. Dessa erfarenheter kommer att vara till nytta för de kommande detaljundersökningarna för Kärnbränsleförvaret och utbyggnaden av SFR i Forsmark samt lokalisering, utformning och uppförande av SFL.

Bergets egenskaper och de hydrokemiska processer som sker i berget studerades grundligt under byggandet av anläggningen och det första decenniet laboratoriet var i drift. Resultat och kunskap från dessa insatser har legat till grund för att definiera bergets (säkerhetsmässiga) funktion relativt de övriga barriärerna.

Efter driftstarten 1995 påbörjades successivt experiment för att undersöka hur barriärerna och de övriga delarna i Kärnbränsleförvaret (kapsel, buffert, återfyllning, plugg och förslutning) kan utformas och installeras för att ge en optimal funktion. Inte minst viktigt har varit att utveckla och demonstrera metoder för att bygga och driva Kärnbränsleförvaret. Tester har genomförts av i stort sett alla KBS-3-metodens delsystem i realistisk miljö, flera av dem i full skala. Resultaten från flera av dessa experiment utgjorde viktigt underlag till SKB:s ansökningar om KBS-3-systemet. I utvecklingen av KBS-3-systemet kommer Äspölaboratoriet fortsätta spela en viktig roll, bland annat genom de pågående långtidstester som kommer att avslutas de kommande åren. Inför kommande utbyggnad av SFR och uppförande av SFL har experiment kopplade till utveckling av konstruktionsbetong och andra cementbaserade material samt teknik för uppförande av barriärkonstruktioner i SFR och SFL genomförts.



Figur 5-1. Äspölaboratoriet med pågående (fet stil) och avslutade (kursiv stil) experiment.

Idag och under de kommande åren fokuseras insatserna vid Äspölaboratoriet på brytning och utvärderingar av pågående långtidsförsök samt fortsatt optimering av de tekniska barriärerna, där fokus för teknikutvecklingen kommer att vara test och kontroller av lerbarriärer, prototyptrustningar och system för tillämpning i Kärnbränsleförvaret. Se även avsnitt 4.10.1 för en beskrivning av de långtidsförsök som fortfarande pågår.

Efter tre decennier av forskning och utveckling vid Äspö har de ursprungliga målen med berglaboratoriet (undermarksanläggningen) uppfyllts. De långtidsförsök som fortfarande pågår kommer att kunna avslutas under 2024. Vid denna tidpunkt bedömer SKB att kvarstående test och provning i undermarksmiljö kan avvakta och genomföras i samband med utbyggnaden av Kärnbränsleförvaret. SKB har under flera år aktivt försökt hitta aktörer som vill driva Äspölaboratoriet vidare som en öppen test- och demonstrationsmiljö. I brist på tillräckligt stort affärsintresse och samhällsnytta har detta initiativ nu stängts. SKB planerar att inleda avveckling av berglaboratoriet under 2025, men bevakar fortfarande intressen för alternativa användningsändamål av bergvolymen, till exempel som energilagrar. Äspölaboratoriets anläggningar på markytan – Vattenkemilaboratoriet, Materialforskningslaboratoriet, Testhallen samt kontor och förråd, behöver SKB använda bortom 2030 för fortsatt forskning och utveckling.

Vattenkemilaboratoriet

Vattenkemilaboratoriet på Äspö är ackrediterat enligt ISO17025 för att analysera de kemiska komponenter i grundvatten som är av särskild betydelse för slutförvarens funktion efter förslutning. Under platsundersökningsskedet ansvarade laboratoriet för hanteringen av samtliga analyser och resultat-sammanställningar för platsundersökningarna i både Forsmark och Laxemar. Laboratoriets samlade kompetens har nyttjats för att etablera och ackreditera motsvarande laboratorium i Forsmark.

Materialforskningslaboratoriet

SKB driver också en laboratorieverksamhet som fokuserar på forskning om lermaterialens fysikaliska och kemiska egenskaper, främst när det gäller frågor som har betydelse för pågående och kommande säkerhetsanalyser. I laboratoriet utvecklas också standardiserade test- och undersökningsmetoder som ska användas vid kontroll av bentonitleveranser under driftskedet. Under kommande år etableras också metoder för analys av spårämnen i kopparmaterial. Laboratoriet är idag inrymt i samma byggnad som vattenkemilaboratoriet på Äspö, men verksamheten kan i framtiden omlokaliseras utifrån SKB:s behov.

I början av 2022 installerades två nya instrument för analyser av koppar. Det ena analyserar halten av väte och syre på ppm-nivå och det andra halten av andra föroreningar, till exempel zink, vismut och silver.

Testhallen

Sedan 2007 bedriver SKB forskning och utveckling i det som nu benämns Testhallen och som ligger ovan mark i direkt anslutning till Äspölaboratoriet. Försöken i Testhallen kompletterar de försök som görs under mark samt i de andra laboratorierna på Äspö.

I Kärnbränsleförvaret omges kopparkapseln av högkompakterad bentonit. Bentonit omger även silon i SFR och planeras som barriär i SFL. Bentonit kommer även att användas för återfyllning av tunnarna i förvaren. I Testhallen genomför SKB undersökningar av bentonitens egenskaper bland annat genom att simulera olika vattenförhållanden på ett kontrollerat sätt. Där utvecklas även installationsmetoder för att fylla igen förvarets tunnlar med återfyllningsmaterial och bygga pluggar för att försluta deponeringstunnlar och borrhål.

De undersökningar som genomförs i Testhallen är ofta förberedande tester i olika skalor och omfattning inför tester i full skala på förvarsdjup i Äspölaboratoriet. I Testhallen finns också utrustning och utrymme för mottagning av bentonitleveranser och blandning av bentonit till önskad vattenhalt.

5.4.2 Kapsellaboratoriet

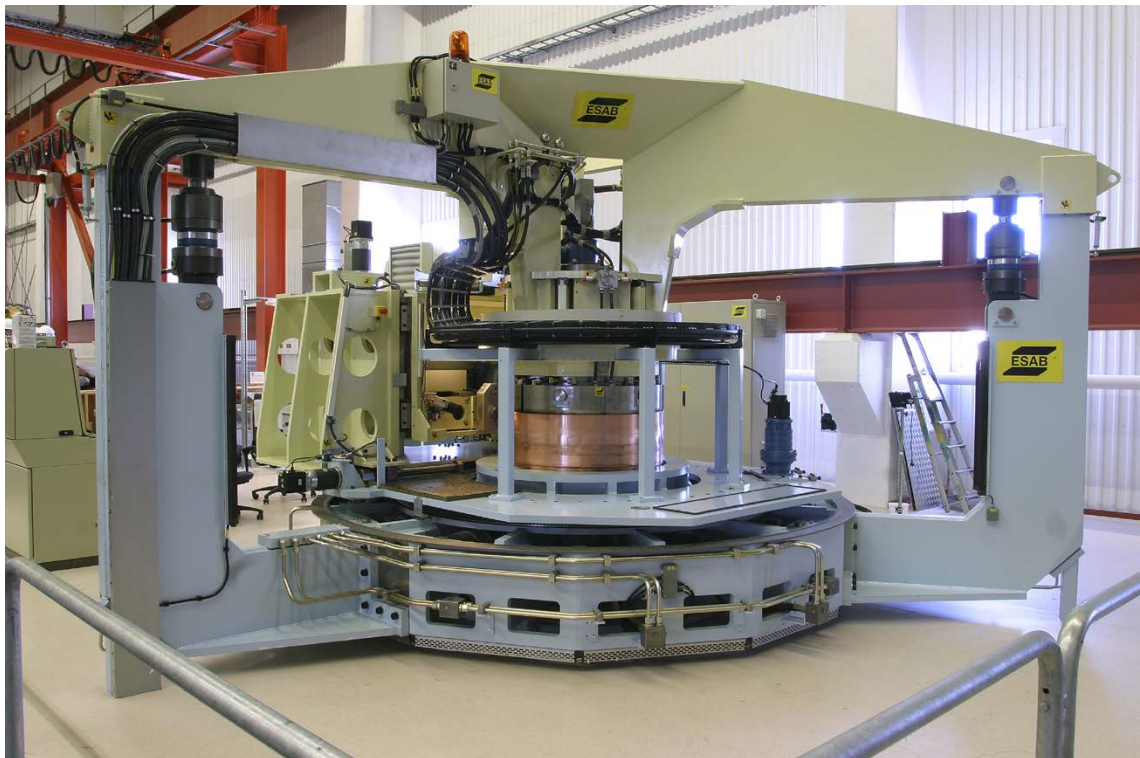
Kapsellaboratoriet ligger inom hamnområdet i Oskarshamn och byggdes under perioden 1996–1998. På Kapsellaboratoriet utvecklas bland annat tekniken för att svetsa botten på kopparrören och försluta locket på kapseln. Även kapselns olika delar, före och efter svetsning kontrolleras och provas här. De flesta försöken görs i full skala.

Utvecklingen av tillverkningsmetoder för kapselns alla komponenter leds av SKB, sedan görs tillverkningsförsöken hos externa leverantörer. Efterföljande undersökning och utvärdering sker till stor del på Kapsellaboratoriet. Målet är att utveckla metoder för tillverkning samt tekniker för kontroll och provning. Dessa metoder och tekniker ska uppfylla fastställda kvalitetskrav samt ha tillräckligt hög tillförlitlighet för att användas i kapselproduktionen och i Clink. Viktiga utrustningar som finns i laboratoriet är ett system för friktionssvetsning med roterande verktyg, utrustningar för oförstörande provning omfattande bland annat ett röntgensystem, ultraljudsprovning av friktionssvetsen, virvelströmsmätning, dragprovningssystem, instrument för kemisk analys av koppar-komponenters sammansättning, ljusoptisk och elektronmikroskop samt hanteringssystem för fullstora kapslar. Figur 5-2 visar utrustningen för friktionssvetsning.

5.5 IT-arbetsverktyg

Genomförande av det forsknings-, utvecklings- och projekteringsarbete som behövs för att utveckla kärnkraftverken och slutförvara kärnavfallet kräver tillgång till kraftfulla och relevanta IT-arbetsverktyg. SKB och reaktorinnehavarna har utvecklat eller införskaffat en uppsättning sådana verktyg. I detta avsnitt ges en kort överblick av förvaltning och utveckling av de databaser, modell- och beräkningsverktyg samt undersökningsmetoder och instrument för platsmodellering som används.

I och med att samtliga kärnkraftsbolag lyder under samma övergripande krav från lagstiftning och myndigheten, så finns goda möjligheter för samordning av IT-lösningar, men även forum för gemensam samordning av planering, strategiska frågor, kravtolkning med mera.



Figur 5-2. Utrustningen för friktionssvetsning.

5.5.1 Databaser

Hantering av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle medför hantering av stora mängder data som samlas och struktureras i databaser. IT-området utvecklas snabbt vilket medför att verktyg och databaser tillkommer, förvaltas och byts ut fortlöpande för att följa utvecklingen gällande både säkerhet och funktionalitet. Databaser förvaltas och integreras mot system i SKB:s driftverksamhet, forskning och utveckling samt de byggprogram och projekt som nu genomförs och planeras framöver.

SKB använder databaserna Dark och PlutoWeb för använt kärnbränsle och långlivat avfall som mellanlagras i Clab samt Gadd (gemensam avfallsdriftdatabas) för allt låg- och medelaktivt avfall som deponerats i SFR. Databasen Gadd har utvecklats i etapper och inkluderar numera kärnavfall från de kärntekniska anläggningarna som levererar avfall till SFR. Inom forskning och för att genomföra säkerhetsanalyser används ett flertal databaser med data hämtade från egna forskningsexperiment, men även från publika källor med till exempel radionukliddata och termodynamiska data. I databasen Sicada lagras data från bland annat platsundersökningar och från analyser genomförda vid SKB:s olika laboratorier och en GIS-databas används för geografisk informationshantering och modellering. Krav som identifierats och tillämpas enligt SKB:s systematiska hantering (avsnitt 5.3.5) dokumenteras och följs upp i databasen Doors NG.

För dokumentation av tekniken tillämpas flera applikationer och systemlösningar för att stödja olika verksamheter inom företaget. Exempel på applikation som dokumenterar anläggningarnas konstruktion är Autodesk Autocad. Det finns även databaser av mer administrativ karaktär såsom Bibas som är SKB:s biblioteks-databas och SKBdoc som är dokumenthanteringssystemet.

5.5.2 Modell- och beräkningsverktyg

Modelleringar och beräkningar är en central del av arbetet med konstruktion samt utvärdering och analyser av säkerhet under drift och efter förslutning. För att kunna genomföra alla de analyser och beräkningar som erfordras för att hantera det radioaktiva avfallet och det använda kärnbränslet, använder SKB såväl egenutvecklade modell- och beräkningsverktyg som kommersiella verktyg som vid behov anpassats för SKB:s tillämpning.

Vid genomförande av analyserna av säkerheten efter förslutning för Kärnbränsleförvaret (SR-Site) och för det utbyggda SFR (SR-PSU) användes ett stort antal modell- och beräkningsverktyg (SKB TR-10-51, TR-14-11). Beräkningsverktygen omfattar både kommersiella datorprogram med hundratusentals användare och program speciellt utvecklade för säkerhetsanalyser med uppskattningsvis bara några tiotal aktiva användare och utvecklare. För att programvaror ska få användas som en del i säkerhetsanalyserna har SKB kvalitetskrav som beräkningsverktygen ska uppfylla. Enligt dessa krav (kapitel 2 i SKB TR-10-51) ska det finnas dokumentation som styrker att

- programvaran är lämplig för sin uppgift i säkerhetsanalysen,
- programvaran har utvecklats på ett ändamålsenligt sätt och beräkningarna ger korrekta resultat,
- programvaran har använts på ett korrekt sätt och att det finns en beskrivning över hur data överförs mellan olika beräkningsuppgifter.

De data som används i beräkningarna kommer huvudsakligen från SKB:s eller kommersiellt tillgängliga databaser (avsnitt 5.5.1).

Modell- och beräkningsverktygen underhålls och uppdateras löpande i takt med den allmänna utvecklingen av dator- och operativsystem. SKB:s beräkningskapacitet förbättras också löpande för att möta de ökande beräknings- och datalagringsbehoven.

SKB strävar efter att ha egen kompetens när det gäller samtliga programvaror som används i säkerhetsanalyser och bedriver ett utvecklingsarbete för att optimera vissa av de kommersiella verktygen för säkerhetsanalysernas behov. Det sker också en fortlöpande utveckling av egna beräkningsverktyg.

Modeller relevanta för SKB:s verksamhet inom säkerhetsanalyser sparas i en egenutvecklad modell-databas. Databasen möjliggör versionshantering samt bevarande av använda modeller använda i tidigare utförda säkerhetsanalyser.

5.5.3 Undersökningsmetoder och instrument för platsmodellering

För att samla in de data som behövs för att modellera och värdera säkerheten hos ett slutförvar har SKB, i många fall tillsammans med systerorganisationer och samarbetspartner, utvecklat speciella undersökningsmetoder och instrument, som vidareutvecklas i mån av behov. SKB förvaltar en uppsättning mätinstrument för genomförande av platsundersökningar. Dessa instrument förvaras i Instrumentförrådet som ligger i anslutning till Kapsellaboratoriet i Oskarshamn. Från förrådet har ett kilometerdjupt borrhål borrats som används för test och kalibrering av borrhålsinstrument.

En platsbeskrivande modell är en integrerad beskrivning av flera vetenskapsområden. Modellen utgör en sammanställning av mätdata, konceptuella modeller, strukturella geologiska modeller, ytekologiska modeller samt kvantifierade beskrivningar av platsens hydrogeologiska och hydrogeokemiska utveckling fram till idag. En platsbeskrivande modell är en av grundstenarna för förvarsutformning, miljökonsekvensanalyser och för analysen av säkerheten efter förslutning för ett förvar. SKB har tagit fram platsbeskrivande modeller för Forsmark (SKB TR-08-05, TR-11-04) och Laxemar (SKB TR-09-01).

Genom att Forsmark valts som plats för slutförvaren både för använt bränsle och för kortlivat låg- och medelaktivt radioaktivt avfall, anses det idag enbart motiverat att uppdatera de ämnesspecifika modellerna för Forsmark. Uppdatering av den platsbeskrivande modellen för Laxemar kan bli aktuell som en del i arbetet med lokalisering av plats för SFL.

I Forsmark pågår, sedan platsundersökningarna avslutades, ett övervakningsprogram där data samlas in om grundvattenstryck, grundvattnets sammansättning, seismiska händelser, nederbörd, temperatur, utveckling av ekosystem med mera. Det innebär att nya data successivt tillförs som kan användas för uppdatering av den platsbeskrivande modellen. Den ligger bland annat till grund för projektering och kommer att uppdateras i samband med den successiva utbyggnaden av förvaren. Större uppdateringar kommer att göras om det finns väsentlig ny information inför förnyade säkerhetsredovisningar i enlighet med aktivitetsplanen som redovisas i kapitel 3.

Inför kommande byggstarter förbereder SKB för att det ska finnas metodik fastlagd för ämnesvis och integrerad geovetenskaplig modellering i olika skalor och för olika ändamål samt undersökningsprogram med tillhörande metodbeskrivningar för undersökningar för respektive förvar.

5.5.4 Kvalitetssäkring

För att se till att resultat från forskning och teknikutveckling är korrekta och håller hög kvalitet har SKB rutiner för kvalitetssäkring av resultaten. I SKB:s ledningssystem ingår bland annat rutiner för upphandling, godkännande av att leverantörer har rätt kompetens och kan leva upp till SKB:s krav, godkännande av innehåll i databaser, godkännande av modell- och beräkningsverktyg samt godkännande av indata till modeller och beräkningsresultat.

Resultat från SKB:s forskning och utveckling redovisas i allmänhet i SKB:s rapportserier eller i vetenskapliga publikationer. De rapporter och övriga dokument av betydelse för säkerheten som SKB tar fram genomgår en dokumenterad granskningsprocess, enligt SKB:s ledningssystem, se avsnitt 5.2.3. Granskning sker för att säkerställa att dokumenten uppfyller ställda krav vad gäller omfattning och innehåll samt att den information som lämnats är sakligt korrekt och baserad på godkända källor och beräkningsverktyg.

5.6 Kompetens och resurser

SKB:s breda och mångfacetterade verksamhet medför att företaget behöver tillgång till kompetens inom många olika områden. En stor del av den kunskap och teknik som SKB behöver ingår i den allmänna naturvetenskapliga kunskapsmassan och utvecklas inom vetenskapssamhället, medan andra delar är specifikt kopplade till hantering och slutförvaring av kärnavfall. Det gäller till exempel stora delar av den detaljerade kunskapen om funktionen hos förvarens barriärer i en geologisk miljö. Den är så specifik för kärnavfallsområdet att kunskapen behöver genereras av SKB självt eller i samarbete med andra aktörer.

SKB behöver säkerställa att företaget har tillräcklig egen kompetens för att kunna tillgodogöra sig den kunskap som finns i forskarsamhället och som har betydelse för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Det behöver också finnas tillräcklig kompetens för att identifiera nya forskningsbehov och vara en kompetent beställare av forskningsinsatser. Det är därför nödvändigt att det finns en sammanhållen grupp av personer med kunskap om metodiken för analys av säkerhet efter förslutning och med en bred och tvärvetenskaplig insikt om hur de olika processerna som påverkar förvarets säkerhet samverkar. I gruppen behövs också personer med djup kunskap om de ämnesområden som påverkar säkerheten. Genom att SKB driver egen forskning säkerställs denna kompetenshållning.

Behovet av kompetens för att styra och genomföra teknikutvecklingen utgår från de planer som tas fram (avsnitt 5.3.2). För att kunna värdera vilken utveckling som behövs och för att kunna styra den behöver SKB expertkunskap inom respektive produktionslinje. Utvecklingen kan i många fall utföras av olika forskningsinstitut eller konsultbolag, men inom vissa områden där det finns få andra köpare av den kompetens som SKB efterfrågar, behöver SKB egen kompetens. Det gäller speciellt inom områdena radioaktivt avfall, använt kärnbränsle, konstruktion av kapslar, utveckling av cementbaserade material och lerbarriärer samt metodik för undersökning av berget. SKB:s process för kompetensförsörjning syftar till att säkerställa att kompetensen inom sådana områden finns och utvecklas, både på kort och lång sikt.

För att kunna genomföra vissa uppgifter av betydelse för SKB:s verksamhet behövs även tillgång till speciella laboratorier och speciella instrument eller verktyg, till exempel SKB:s materialforskningslaboratorium på Äspö för genomförande av särskilda analyser av bentonit samt Kapsellaboratoriet (avsnitt 5.4).

Den personal som medverkar vid utförandet av transporter utbildas speciellt inom områdena strålskydd, fysiskt skydd, åtgärder i händelse av olycka samt sådan utbildning som krävs enligt MSB:s föreskrifter om transport av farligt gods. Dessutom säkerställs att personal som deltar i transporter har kännedom om SKB:s transportsystem och är förtrogen med såväl SKB:s transporthandböcker som SKB:s transportdokument samt lokalt utarbetade instruktioner kopplat till transporter.

5.6.1 Uppbyggnad, utveckling och bevarande av kompetens

SKB är som verksamhetsutövare skyldig att tillse att uppgifter löses av personer med erforderlig kompetens. Om den kompetensen ska tillgodoses med egen personal eller genom externa leverantörer eller konsulter är till viss del en taktisk fråga. Den avvägning som görs baseras både på en bedömning av vilka uppgifter som är av sådan strategisk eller säkerhetsmässig betydelse att de bör skötas av egen personal, risker med att vara beroende av externa leverantörer och ekonomiska överväganden. Utfallet av bedömningar kring kompetensbehov och avvägningen mellan egen personal och externa leverantörer kan variera över tid.

SKB:s utgångspunkt är att SKB ska ha egen personal med kompetens för att kunna styra och leda arbetet med forskning, utveckling och drift av system för omhändertagande av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. I det ingår att SKB ska ha erforderlig kompetens för att upphandla och värdera de tjänster och varor SKB beställer av externa leverantörer. SKB:s inriktning är att egna resurser ska besitta den kompetens som behövs och utföra de arbetsuppgifter som är av strategisk betydelse för strålsäkerheten. Exempel är säkerhetsanalysmetodik och utveckling av kapslar för använt kärnbränsle där SKB valt att till stor del ha egna resurser för att på lång sikt bygga och bibehålla kompetens inom företaget. Om produkter eller tjänster i övrigt finns hos SKB:s ägare eller är kommersiellt tillgängliga så är den allmänna inriktningen att använda dessa.

SKB har en fastställd process för kompetensförsörjning i ledningssystemet. Den är uppbyggd enligt IAEA:s så kallade SAT-modell (Systematic approach of training) som innebär ett utvecklat arbetssätt med kompetensområden, kvalifikationer med nivåer, kompetensbedömningar och utbildningar kopplat till områden och hantering av gap. Processen medför att SKB har ett systematiskt arbetssätt för att efterleva interna och externa krav för att säkerställa att tillräckligt med kompetens finns tillgänglig för att upprätthålla en hög säkerhet och nå verksamhetens mål på kort och lång sikt. I kompetenssäkringen ingår även att förbereda för kommande förändringar i verksamhet och yttre krav.

Löpande analyser av kompetensbehov, kompetensutveckling och planeringarna görs både på individ- och grupp nivå och med en tidshorisont på fyra till fem år. Med tanke på den tid det tar att utveckla kompetens så är framtidsperspektivet alltid väsentligt. Även strategiska kompetensanalyser med en tidshorisont på cirka tio år görs regelbundet. Utbildningsprogram upprättas vid behov för individer och grupper. Här kan nämnas att ett program har startats för att säkra kompetensöverföring inom områdena hydrogeokemi och säkerhetsanalysetik för Kärnbränsleförvaret, ytterligare beskrivning av detta finns i avsnitt 11.4.1.

För att lagra och bevara den information som identifieras för att säkerställa kompetens och bemanning på kort och lång sikt använder SKB stödsystemet Competence Tool (CT). Till CT länkas dokument från SKB:s dokumentstödsystem som gäller kompetensanalyser, kvalifikationer (kompetensbeskrivningar), befattnings- och rollbeskrivningar, utbildningar, stöddokument, mål- och utvecklingsamtal samt kompetensbedömningar både för individ och grupp inom organisationen.

SKB samarbetar med Vattenfall och deltar i branschgemensamma nätverk med representanter från Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB (KSU), Ringhals AB, Forsmarks Kraftgrupp AB och OKG Aktiebolag med syftet att tillsammans förbättra och utveckla arbetssättet med kompetensanalyser samt gemensam utbildningsverksamhet.

5.6.2 Utvecklingsområden inom kompetens

De rutiner och det arbetssätt som etablerats och de strategiska kompetens- och bemanningsanalyser som genomförs utgör en god grund att hantera kompetensutveckling och kompetensförsörjning på lång sikt. Utveckling av processen för kompetensförsörjning sker fortlöpande och med hänsyn till framtida förutsättningar och krav. Fundamentala delar i kompetenssäkring av SKB:s personal är strategiska kompetensanalyser, kvalifikationer samt kompetensutveckling. Ett par exempel på utvecklingsdelar som finns inplanerade inom området kompetenssäkring:

- **Stödsystem för kompetensanalyser** – Ett nytt stödsystem är på väg att implementeras på SKB, Vision från företaget Focus Learning. Vision har under många år använts inom kärnkraftsbranschen i USA för att på ett säkert sätt lagra samt bedöma viktighet och svårighetsgrader av kompetenser som identifierats via kompetensanalyser. Vision är även behjälplig vid design av utbildningar av befattningar och roller.
- **Filmning av sällanarbete** – SKB har startat ett projekt med att filma det arbete som sällan utförs i SFR för att bibehålla kunskapen på lång sikt. En vidareutveckling av detta är att identifiera och filma den typen av arbeten för alla SKB:s driftsatta anläggningar.

5.6.3 Kompetensnätverk och samarbeten

De grundläggande behoven av kompetens inom forskning, säkerhetsanalys och teknikutveckling tillgodoses av SKB-anställd personal. Inom flera av dessa områden finns också behov av fördjupad kompetens och tillgång till större personella resurser för forsknings- och utvecklingsinsatser. För detta anlitas externa specialister, ofta från nationella och internationella universitet och högskolor, forskningsinstitut och konsultbolag, men även från SKB:s systerorganisationer i andra länder. Många har i varierande utsträckning varit knutna till SKB:s verksamhet i tiotals år. För tillfälliga behov av kompetens och resurser, till exempel för större uppdrag avseende projektering och konstruktion av anläggningar, anlitas i allmänhet externa leverantörer. SKB:s ägare är också en viktig resurs.

Samarbete med universitet, högskolor och forskningsinstitut

SKB samarbetar med ett stort antal svenska och internationella universitet, högskolor och forskningsinstitut för att erhålla kritisk kunskap inom områden där sådan saknas. Genom detta har SKB utvecklat ett brett kompetensnätverk med djupa kunskaper inom flera centrala områden. Tillgången till sådan expertkompetens har i många fall varit, och kommer även fortsättningsvis att vara, en nyckelfaktor för att kunna lösa kritiska forsknings- och utredningsfrågor. Samarbetet kan handla om både kortare, fokuserade forskningsuppdrag och längre uppdrag vilka kan ske inom ramen för en post-doc-anställning eller ett doktorandarbete.

SKB-finansierade doktorander utgör en presumtiv kompetensreserv för SKB och andra i branschen. För närvarande finansierar eller delfinansierar SKB ett tiotal doktorandprojekt. Under den senaste Fud-perioden har nio SKB-finansierade doktorander slutfört sina studier och doktorerat, och genom åren har SKB finansierat eller delfinansierat betydligt fler än 100 doktorander. Många av dessa har under forskarutbildningen och efter doktorexamen haft nyckelroller i framdriften av SKB:s arbete. Idag är ett tiotal tidigare SKB-finansierade doktorander anställda av SKB.

Samarbete med branschorganisationer och externa leverantörer

SKB samarbetar också med andra avfallsorganisationer runt om i världen. Dessa samarbeten har varit och kommer fortsättningsvis vara viktiga för att säkerställa tillgång till kompetens och erfarenheter från motsvarande utvecklingsarbeten i andra länder. Samarbetet sker både bilateralt och i konstellationer med flera organisationer. Ett exempel är det internationella samarbete som SKB samordnar vid Äspölaboratoriet. Ett annat är det nu avslutade Greenland Analogue Project (GAP), ett samarbete mellan SKB, Posiva i Finland och NWMO i Kanada, som omfattade studier av hur en kommande inlandsis kan påverka ett slutförvar för använt kärnbränsle. Inom kopparområdet samarbetar SKB med NWMO i Kanada, både i specifika forskningsuppdrag och i internationella samarbeten där NWMO har en drivande roll, till exempel i MICA-projektet (Michigan International Copper Analogue) och forskningskonsortiet vid Canmet MATERIALS.

Det finns särskilda forum där specialister och modelleringsgrupper från flera länder samarbetar kring utvalda frågor som har betydelse för slutförvaring av kärnavfall. Två forum finns etablerade inom grundvatten- och transportmodellering respektive tekniska barriärer: SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes (Task Force GWFTS) och SKB Task Force on Engineered Barrier Systems (Task Force EBS). Dessa samarbeten syftar till att utvärdera olika koncept och modelleringsmetoder samt främja samverkan mellan experimenterare och modellörer.

Inom ytekosystem samarbetar flera organisationer i Bioprotas med att utveckla metodik, sammanställa data och jämföra modeller för att beräkna konsekvenser på människor och miljön.

Edram är en internationell sammanslutning för organisationer som ansvarar för hanteringen av radioaktivt avfall. Det är ett forum där strategiska frågor av gemensam karaktär diskuteras i syfte att utbyta erfarenheter och stödja varandra. Ett exempel på områden som hanteras är ”knowledge management” sett ur ett långsiktigt perspektiv.

För att säkerställa tillgång till nödvändig kompetens och tillräckliga resurser under perioder med hög arbetsbelastning, framför allt under pågående analyser av säkerhet efter förslutning för de olika förvararna, samarbetar SKB med flera konsultbolag från såväl Sverige, Europa som Nordamerika. Flera av dessa samarbeten har pågått under lång tid och experter inom dessa konsultbolag utgör en viktig del av SKB:s kompetensnätverk.

Samarbete med Posiva

SKB har sedan många år ett fördjupat samarbete med sin systerorganisation Posiva i Finland. Posiva har liksom SKB valt att utforma sitt slutförvar för använt kärnbränsle enligt SKB:s KBS-3-metod. År 2001 ratificerade Finlands riksdag den finska regeringens principbeslut om metod och plats för det finska slutförvaret. Anläggningen ska uppföras i Olkiluoto i Euraåminne. Posiva började 2004 uppföra en berganläggning (Onkalo) i Olkiluoto och nådde 2010 ner till planerat förvarsdjup. Onkalo har använts och används fortfarande för forskning och utveckling, men kommer också att göra tillfarterna till själva slutförvaret.

År 2012 lämnade Posiva in en ansökan om tillstånd för att uppföra en inkapslings- och slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. Den finska Strålsäkerhetscentralen (Stuk) lämnade sitt yttrande över denna ansökan 2015 och rekommenderade den finska regeringen att ge tillstånd. I yttrandet identifierade Stuk ett antal frågor som Posiva behöver lösa och redovisa innan det är möjligt att ge drifttillstånd. Samma år gav finska regeringen tillstånd till uppförandet av slutförvaret och inkapslingsanläggningen. Posiva uppför nu anläggningarna, först nya schakt, de första deponerings-tunnlarna samt inkapslingsanläggningen, och avser kunna påbörja drift, om tillstånd ges för denna,

cirka 2024. Ett stort steg togs i slutet av 2021 då en ansökan om tillstånd för drift av slutförvars- och inkasplingsanläggningen lämnades in till myndigheterna. I samband med denna besvaras också de frågor som Stuk ställde 2015.

Samarbetet mellan SKB och Posiva har sedan 2013 målet att utveckla gemensamma tekniska lösningar för slutförvarssystemet inför driftsättningen. Avtalet gäller i femårsperioder och förnyas vartefter. Samarbetet omfattar kapsel-, bentonit- och bergfrågor, forskningsfrågor, maskinkonstruktion och frågor kopplade till att finna ekonomiskt optimala lösningar utan att säkerheten försämras.

Förutom de effektivitetsvinster som detta samarbete för med sig förstärks även SKB:s förmåga att genomföra forskning och utveckling. Framtagandet av gemensamma planer och gemensamma projekt innebär att dessa får en bredare och mer allsidig beredning och granskning än om SKB drev detta arbete på egen hand. SKB får genom samarbetet tillgång till Posivas anläggningar, speciellt Onkalo, och får även tillgång till de forskningsinstitutioner, institut och andra experter som Posiva samarbetar med. Samarbetet har även betydelse för den framtida kompetensförsörjningen.

Internationella samarbeten inom EU, IAEA och OECD/NEA

Att aktivt delta i internationella samarbete har alltid varit och fortsätter vara en viktig del i SKB:s arbete. Det är en del av omvärldsbevakningen samt en grund för kompetensutbyte och extern granskning av forskningen. SKB deltar sedan många år aktivt i internationella samarbeten via projekt och arbetsgrupper inom EU, OECD/NEA och IAEA.

EU:s arbete inom kärnenergiområdet regleras av Euratomfördraget. EU-kommissionen strävar bland annat efter att harmonisera kärnavfallshanteringen i Europa och har tagit fram direktiv om både kärnsäkerhet och avfallshantering. Forskning inom kärnavfallsområdet har varit en del av EU:s forskningsprogram i många år. Sedan 2019 bedrivs forskningen inom ramen för Eurad. Ett program har utformats av ett antal aktörer inom avfallsområdet såsom avfallsorganisationer (till exempel SKB), så kallade ”Technical Support Organisations” samt forskningsinstitut. Programmet startade 2019 och löper på fem år. Det består, i dess första fas av sju olika forskningsprojekt, två strategiska projekt samt insatser om kunskapsöverföring. SKB deltar i projekt inom programmet samt har experter som medverkar i referensgrupper till projekt. Under 2021 har planering för en fortsättning av Eurad startats och SKB avser att delta i kommande program (Eurad 2).

SKB har en aktiv roll inom Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform (IGD-TP) som har visionen att ett slutförvar för högaktivt avfall och/eller använt bränsle ska vara i drift 2025. IGD-TP är avfallsorganisationernas part inom Eurad-programmet. Plattformen har varit betydelsefull för inriktningen av EU:s forskningsprogram. Medlemmar i plattformens styrgrupp är organisationer med ansvar för avfallsprogram i de elva länderna, ONDRAF/NIRAS (Belgien), Posiva (Finland), Andra (Frankrike), BMWi (Tyskland), Enresa (Spanien), SKB (Sverige), Nagra (Schweiz), RWM (Storbritannien)¹, Puram (Ungern), Covra (Nederländerna) och Surao (Tjeckien).

SKB deltar i OECD:s samarbetsorganisation för kärnenergifrågor NEA. Inom NEA finns bland annat RWMC och Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management (CDLM) som består av företrädare från myndigheter och avfallsorganisationer. Vart fjärde år arrangerar OECD/NEA konferensen International Conference on Geological Repositories, och den sjätte i ordningen genomfördes i Helsingfors i april 2022. Deltagandet vid dessa är ett viktigt erfarenhetsutbyte för SKB.

Det internationella atomenergiorganet International Atomic Energy Agency (IAEA), håller också i ett antal projekt och grupper där SKB och dess ägare deltar i flera projekt inom såväl slutförvars- som avvecklingsfrågor. Hösten 2021 anordnade IAEA en workshop inom området knowledge management där SKB var med som föredragande.

Sverige har ratificerat IAEA:s avfallskonvention (Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management) och SKB bidrar till den nationella rapport som SSM, i enlighet med konventionen, tar fram vart tredje år. Rapporten granskas av konventionsparterna vid särskilda granskningsmöten.

¹ Sedan januari 2022 är RWM en del av Nuclear Waste Services (NWS).

5.6.4 Närliggande utmaningar och upprätthållande av kompetens på längre sikt

SSM skickade hösten 2021 en remiss gällande Nationell strategi för kompetensförsörjning inom strålsäkerhet, där SKB fick möjlighet att svara. I sitt yttrande lyfte SKB fram flera olika områden som kan utvecklas. Det är av stor vikt med en samordning på nationell nivå och att hela branschen arbetar tillsammans för att lyckas med en långsiktig kompetensförsörjning. SKB har tillsammans med ägarna av reaktorerna och andra kärntekniska anläggningar tagit en ledande roll i detta arbete.

Allmänna och grundläggande förutsättningar

SKB har behov av kompetens inom många områden med en viktning mot personer utbildade inom naturvetenskap och teknik. De områden inom vilka SKB kommer att behöva kompetens förväntas vara relativt oförändrade över tid, men förutom fortsatt behov av kompetens inom forskning och teknikutveckling tillkommer stort behov av kompetens för uppförande, drift och avveckling av anläggningar.

Allmänt sett är den nationella trenden med vikande intresse för tekniska och naturvetenskapliga utbildningar ett problem för SKB, liksom för svensk industri som helhet. Förutom att detta kan leda till brist på examinerade inom relevanta områden, så har det negativa effekter på lärosätenas möjligheter att bedriva utbildningsprogram inom relativt sett smala områden som kärnteknik och bibehålla viktiga forskningsmiljöer, vilket bland annat belyses i SSM:s utredning (Hällgren 2018). Det är således en gemensam viktig fråga för flera aktörer, att öka intresset för naturvetenskap och teknik så att tillräckligt många personer kan utexamineras.

Att säkra kompetens inom områden viktiga för slutförvar av kärnavfall och avveckling av kärntekniska anläggningar, är en för SKB och dess ägarbolag en strategiskt viktig fråga på både kort och lång sikt. Slutförvaring och avveckling innebär ett brett behov av kompetens som förutom kärnteknik och strålskydd omfattar geovetenskap, geoteknik, materialfrågor, anläggningsteknik, instrument- och mätteknik samt kompetens om klimatutveckling. Utgångspunkten är att det är samhällets ansvar att tillhandahålla grundutbildning av till exempel civilingenjörer och upprätthålla grundkompetens inom relevanta områden, men industrin kommer även att behöva göra särskilda insatser. För att säkra kompetens inom landet kommer samarbete med universitet och högskolor att vara en del i den långsiktiga kompetensförsörjningen, samt att fortsatt uppmuntra samarbete inom branschen för att både behålla och attrahera ny personal inom dessa områden.

SKB arbetar tillsammans med ägarna för att öka branschens attraktionskraft och avser fortsätta arbetet med att stärka förtroendet för SKB:s uppdrag genom att lyfta fram de många intressanta och utmanande uppgifter och roller som behövs för att lösa uppdraget. SKB samverkar med företag och skolor, i första hand på de orter där SKB är verksamt samt deltar vid arbetsmarknadsdagar, mässor och olika branschevenemang.

Allmänt sett och i det längre tidsperspektivet räknar SKB med att huvuddelen av personalbehovet kan tillgodoses av personal med för uppgiften relevant grundutbildning (gymnasium, högskola eller universitet) inom ämnesområdet, som sedan vidareutbildas av SKB för de företagsspecifika tillämpningarna. Därutöver behövs ett mindre antal personer med djup kompetens, till exempel forskarutbildade, kombinerat med lång erfarenhet av för SKB viktiga områden.

Pågående och planerade aktiviteter

SKB fortsätter med att bidra till olika professurer och platser på högskolor och universitet samt med att informera om uppdraget och vilka kompetenser som kommer att vara eftertraktade på universitet och högskolor som har relevanta utbildningar för att säkra långsiktig kompetensförsörjning. Där det är lämpligt och finns förutsättningar att agera stöder SKB doktorandprojekt som kan bidra till uppbyggnad och bevarande av goda forskningsmiljöer. Förutom att utveckla kunskapen i frågor av betydelse för slutförvaring av avfall blir de doktorander SKB finansierar ett betydande tillskott till kompetensförsörjningen, framför allt av expertkompetens, för SKB såväl som för andra aktörer inom området.

Även andra delar av branschen främjar utbildning inom teknikområdet. Till exempel så stödjer Vattenfall finansiellt ett högskoleingenjörsprogram inriktat på kärnkraft vid Uppsala universitet samt Vattenfallgymnasiet i Forsmark för att säkra tillgång till kvalificerad kompetens långt in på 2040-talet. Dessutom finansierar Forsmarks Kraftgrupp AB, Ringhals AB, OKG Aktiebolag och Westinghouse Electric Sweden AB ett nationellt forskningscentrum (SKC), Svenskt Kärntekniskt Centrum. SKC stödjer utbildning, forskning och utveckling inom kärntekniska tillämpningar vid högskolor och universitet i Sverige.

På lokal nivå, på de platser SKB har verksamhet, är SKB med och bidrar med kompetens och utrustning till Teknikcollage som erbjuder extra kurser. Dessa kan läsas på gymnasium, framför allt genom de tekniska programmen.

För smala kompetensområden där det kanske finns någon enstaka expert på SKB eller ibland i Sverige är det internationella samarbetet SKB har med andra avfallsorganisationer väsentligt (avsnitt 5.6.3). SKB har genom det möjlighet att anlita experter från dessa organisationer antingen för att genomföra uppdrag åt SKB eller för att utbilda personal inom SKB. Det i avsnitt 5.6.3 nämnda samarbetet med Posiva, har bland annat som syfte att upprätthålla kompetens och stötta respektive organisation inom smala kompetensområden för kärnavfallsfrågan.

Det kan även noteras att frågor om kompetenshållning diskuteras ingående internationellt inom bland annat IAEA, NEA och EU samt bland andra kärnavfallsorganisationer. SKB bedömer det internationella samarbetet som viktigt för att utveckla och säkra kompetensen på lång sikt.

Närliggande utmaningar

En närliggande utmaning för SKB är uppförandet de nya anläggningar som sedan ska drivas under lång tid. SKB bygger upp en beställarorganisation för att upphandla, styra och följa upp de entreprenader som uppförandet av respektive anläggning kommer att delas upp i. Då uppförandet av anläggningarna i huvudsak omfattar tillämpning av väl etablerad teknik räknar SKB med att anlita etablerade leverantörer (entreprenörer) med erforderlig kompetens. SKB har sedan tidigare erfarenhet, till exempel från uppförandet av Clab och platsundersökningarna, av att styra leverantörer och tillse att de lever upp till SKB:s i många fall specifika krav.

En av svårigheterna med att hitta lämpliga leverantörer för anläggningsprogrammen är konkurrensen om personal från andra stora infrastrukturprojekt under de kommande decennierna. En annan kan bli tillgången på den seniora kompetens som behövs, med tanke på den generationsväxling som sker nu när många av de som byggt upp det svenska kärnavfallsprogrammet snart går eller har gått i pension.

Utmaningar på längre sikt

När det gäller kompetensförsörjning på mycket lång sikt, det vill säga 50–100 årsperspektivet, så finns två viktiga förutsättningar som behöver beaktas:

- SKB:s verksamhet planeras pågå fram till cirka 2090 och behöver redan nu ha en framförhållning för vilka kompetenser som är viktiga i det långsiktiga perspektivet.
- SKB är dominerande aktör i Sverige när det gäller hantering av radioaktivt avfall.

Det långa tidsperspektivet kan vara en fördel, eftersom kompetensutveckling och kompetensförsörjning kan planeras på lång sikt på ett sätt som få andra företag kan. SKB har väl utvecklade processer för kompetensutveckling och kompetensförsörjning, se avsnitt 5.6.1 och 5.6.2, som ger en god grund för att SKB ska ha den kompetens som behövs för att genomföra den planerade verksamheten enligt ställda interna och externa krav.

En aspekt som särskilt behöver beaktas under anläggningarnas hela livstid är att ha medarbetare med anläggningskännedom och för slutförvaren även kännedom om det omgivande berget. Särskilda insatser kommer att behövas när det gäller bevarande av kunskap och kompetens avseende dessa områden såsom god dokumentation, utbildning av personal och redundant bemanning. Ett arbete med att ta fram processer och rutiner för överföring av kunskap och erfarenheter mellan medarbetare och till nyanställda (knowledge management) där fokus ligger långt fram i tid pågår på SKB, se avsnitt 4.13.1.

SKB:s roll som den huvudsakliga arbetsgivaren när det gäller hantering av radioaktivt avfall gör företaget känsligt för den allmänna trend med ökad rörlighet på arbetsmarknaden som finns i dagens samhälle. När någon slutar kan det vara svårt att hitta ersättare med rätt kompetens. SKB är dock inte den enda arbetsgivaren inom området utan motsvarande kompetenser antas fortsatt även finnas hos ägarbolag, leverantörer, konsultföretag och myndigheter.

En risk som SKB identifierat är om det av någon anledning blir uppehåll i någon del av verksamheten och de problem som då kan uppstå med att behålla kompetens inom olika områden. Uppehåll i en verksamhet kan vara planerad eller oplanerad. Planerade uppehåll i en verksamhet kan till exempel vara platsundersökningar som redan genomförts för Kärnbränsleförvaret och SFR-utbyggnaden och som inom ett antal år ska genomföras för SFL. Ett uppehåll inom en del av SKB:s verksamhet leder normalt till behov av omplacering av personal, men kan även leda till uppsägningar. Förutsättningarna för omplacering av personal beror naturligtvis på kompetensområde. SKB ser relativt goda förutsättningar att bibehålla bemanning och kompetens hos experterna som arbetar med säkerhetsanalyser. Säkerhetsanalyser ska genomföras med jämna mellanrum som en del i den stegvisa prövningen för de tre slutförvararna. De som arbetar med forskning och teknikutveckling kan även i utökad omfattning arbeta inom internationella projekt eller via SKB International lånas ut till avfallsorganisationer i andra länder. För andra personalkategorier, till exempel operativ driftspersonal, kan finnas möjligheter att låna ut personal till SKB:s ägare där likartade arbetsuppgifter förekommer.

SKB bedömer eventuella problem som hanterbara och ser det som möjligt att genom att tillämpa och vidareutveckla rutinerna för kompetensutveckling och kompetensförsörjning slutföra SKB:s uppdrag med att slutförvara det radioaktiva avfallet från kärnkraftverken med bibehållen kompetens.

Del II

Avfall och slutförvaring

- 6 Låg- och medelaktivt avfall
- 7 Använt kärnbränsle
- 8 Kapsel för använt kärnbränsle
- 9 Cementbaserade material
- 10 Lerbarriärer och förslutning
- 11 Berg
- 12 Ytekosystem
- 13 Klimat och klimatrelaterade processer

I del II av Fud-program 2022 beskrivs planerade forsknings- och teknikutvecklingsinsatser under Fud-perioden. Fokus ligger på de frågor som SKB identifierat som prioriterade för framdriften i den fortsatta hanteringen och slutförvaringen av radioaktivt avfall och använt kärnbränsle. Nuläge och program presenteras för det låg- och medelaktiva avfallet, det använda kärnbränslet och försvarssystemens delar, vilket innebär att viss forskning och teknikutveckling beskrivs integrerat för de tre slutförvaren. Beskrivningen av nuläget är översiktlig och hänvisar till mer detaljerad resultatredovisning i underlagsrapporter etc. Presentationen av de prioriterade forsknings- och teknikutvecklingsinsatserna under Fud-perioden redovisas som punktsatser i programavsnitten.

För tillståndsgiven verksamhet redovisas resultaten från pågående forskning och teknikutveckling mer detaljerat i den stegvisa prövningen enligt KTL för respektive anläggning.

6 Låg- och medelaktivt avfall

Låg- och medelaktivt avfall utgörs av drift- och rivningsavfall från de svenska kärntekniska anläggningarna samt radioaktivt avfall från forskning, sjukvård och industri. Avfall med begränsad mängd långlivade radionuklider betraktas som kortlivat och slutförvaras i SFR medan långlivat avfall planeras att slutförvaras i SFL. I detta kapitel redovisas den forskning och utveckling som SKB under Fud-perioden ämnar bedriva för att öka kunskapen kring processer och egenskaper kopplade till låg- och medelaktivt avfall i SFR och SFL.

6.1 Sorptionspåverkan

I SFR är sorptionen av radionuklider på cementmineral en av de viktigaste processerna som fördröjer utsläppet av radionuklider från förvaret. Komplexbildande ämnen kan minska sorptionen av radionuklider och därmed påskynda deras uttransport ur förvaret. Mängden komplexbildare i avfallet minimeras genom krav i acceptanskriterier för avfall. Det finns också organiska material som under vissa betingelser kan brytas ned till komplexbildande ämnen. Förståelsen för nedbrytningsprocesserna och de produkter som bildas vid nedbrytning, har därför stor betydelse för bedömningar av vilka material som måste begränsas i SFR samt hur sorptionen av radionuklider ska hanteras i SKB:s analys av säkerhet efter förslutning.

Sorptionen i SFR kvantifieras i form av sorptionskoefficienter, K_d . För de radionuklider där det saknas specifika K_d -data använder SKB kemiska analogiresonemang, alltså antagandet att samma K_d -värde kan tillämpas som för ett kemiskt liknande ämne för vilket data finns tillgängliga.

Olika typer av organiskt material förekommer i konstruktionsmaterialet och avfallet som ska deponeras i SFR. Av de organiska materialkategorier, som kan ge upphov till komplexbildare, har SKB bland annat bedrivit utredningar av cellulosa, cementtillsatsmedel och filterhjälpmedel.

Under alkaliska förhållanden kan cellulosa brytas ner till isosackarinat (ISA) (Glaus et al. 1999). Nedbrytningsmekanismen är väl studerad (Glaus och Van Loon 2008) och SKB har använt hastighetskonstanten som presenterats i studien för att uppskatta koncentrationen av ISA i SFR (Keith-Roach et al. 2014, 2021). ISA kan fungera som ligand och bilda lättlösliga metallorganiska komplex med flertalet radionuklider. ISA kan också sorbera på cementmineral (Ochs et al. 2014), vilket minskar tillgängligheten av ISA för komplexbildning med radionuklider.

I såväl SFR-utbyggnaden som i det kommande SFL kommer stora mängder betong att användas som konstruktions- och kringgjutningsmaterial. För att erhålla en högkvalitativ betong med lämpliga egenskaper kommer betongtillsatsmedel såsom superplasticerare att behöva användas. Superplasticerare utgörs av organiska polymerer som över tid kan komma att brytas ned till lättlösliga organiska föreningar. Dessa nedbrytningsprodukter kan påverka speciering och transport av radionuklider när de befinner sig i lösning. Den effekten har däremot inte observerats för superplasticerare i solid betong eller cement, vilket förklaras av att de sitter starkt bundna i det härdade materialet (NDA 2015, 2017, Keith-Roach och Höglund 2018, Bamforth et al. 2012, Young et al. 2013, Glaus och van Loon 2004). Av denna anledning visar försök med radionuklider och superplasticerare ingjutna i betong ingen påverkan på radionuklidsorptionen (NDA 2015). Ytterligare lakttest med varierande förhållande mellan mängden fastfas respektive vätskefas, bekräftade resultaten att superplasticerare inte ökar transporten eller mobiliteten av radionuklider i betong (NDA 2015). Dessa experiment är genomförda under mer förvarsliga betingelser än traditionella experimentuppsättningar och ger därför information som är mer relevant för SFR.

Ett annat organiskt material som ofta förekommer i driftavfallet från kärnkraftverken är filterhjälpmedel som UP2. Detta filterhjälpmedel består huvudsakligen av polyakrylonitril (PAN). Under alkaliska till hyperalkaliska förhållanden bryts polymerstrukturen ned och bildar lättlösliga föreningar som potentiellt kan påverka sorptionen och/eller lösligheten av radionuklider genom komplexbildning (Duro et al. 2012).

Nuläge

Två studier kring sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från cellulosa som SKB finansierat avslutades under 2018 i form av doktorsavhandlingar (González-Siso 2018, Tasi 2018). Den första studien handlar bland annat om nickelsorption i närvaro av ISA. Nickel bildar komplex med ISA under reducerande alkaliska förhållanden såsom i SFR. Komplexbildning visades leda till ökning av lösligheten för nickel och jämviktskonstanter för ett antal olika Ni-ISA-komplex har tagits fram. En sammanfattning av resultaten från González-Siso (2018) finns tillgänglig i Bruno et al. (2018) och resultaten från denna studie när det gäller sorptionskoefficienter K_d för nickel på cement samt specieringen av uran under SFR-förhållanden, har tillämpats direkt i PSAR för SFR.

I den andra avhandlingen har sorptionsexperiment legat till grund för en modell som beskriver sorption av plutonium på cement i närvaro respektive frånvaro av ISA. I samma studie har sorptionsreduktionsfaktorer för plutonium kunnat härledas för olika koncentrationer av ISA. De uppdaterade sorptionsreduktionsfaktorerna för plutonium (Tasi 2018, Tasi et al. 2021), liksom sorptionskoefficienter K_d för plutonium på cement i frånvaro av ISA, har använts i PSAR SFR.

En systematisk litteraturgenomgång och termodynamiska beräkningar av hur ISA och andra komplexbildare i avfall påverkar sorptionen av olika ämnen har utförts av Keith-Roach och Shahkarami (2021) inom ramen för acceptanskriterier för avfall (WAC). Studien bekräftar att det tidigare WAC-gränsvärdet för ISA om 10^{-4} M fortfarande är lämpligt att använda. Däremot föreslår de att gränsvärdena för vissa andra komplexbildare höjs, vilket för di- och trikarboxylsyror innebär att koncentrationen av dessa inte längre behöver begränsas med hänsyn till komplexbildning. Anledningen är framför allt konkurrens från stabila Ca^{2+} - och OH^- -joner från cement som förekommer i hög halt i SFR. Detta sänker graden av komplexbildning mellan radionuklider och organiska komplexbildare, vilket inte beaktats fullt ut i tidigare acceptanskriterier.

De studier kring sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från cementtillsatsmedel som används i konstruktionsbetong och som SKB startade under 2016 har avslutats (Chernyshev et al. 2018, 2021). I studien karakteriserades superplasticerarens struktur och det visades att polymeren innefattar organofosfatgrupper. Hastighetskonstanten för nedbrytning av superplasticeraren och frigörelsen av fosfat bestämdes och visades vara snabb. Den studerade superplasticeraren ökar lösligheten av både nickel(II) och europium(III) genom komplexbildning vid pH 12,4. Vid ännu högre pH påskyndas nedbrytningen av superplasticeraren och avspjälkning av fosfaten, vilket i studien ledde till utfällning av Ni- respektive Eu-fosfat. Det är viktigt att notera att båda studierna av Chernyshev et al. utfördes i lösningsfas. I SFR kommer superplasticerare att användas i konstruktionsbetong där de anses vara fastbundna och därmed kan förväntas degradera långsammare och få mindre påverkan på radionuklidens speciering, såsom beskrivs i början av detta avsnitt 6.1. De två studierna har därför begränsad relevans för SFR.

SKB har tagit fram gränsvärden för superplasticerare i kringgjutnings- och solidifieringsbruk i kollin, eftersom radionuklider där kommer i kontakt med superplasticerare i löst form (Hedström 2019a, b). Gränsvärdena har justerats något i WAC 5.0, med anledning av resultat från Keith-Roach och Shakarami (2021).

Innehållet i betongtillsatsmedel är ofta inte offentligt tillgängligt eftersom företagen som tillverkar dessa vanligen inte öppet redovisar medlens sammansättning. Detta kan begränsa möjligheten för SKB att på förhand utreda vad ett tillsatsmedel innehåller. Däremot kan mer information om sammansättningen i allmänhet erhållas vid inköp av en produkt. I god tid innan byggstart för SFR-utbyggnaden och SFL är det viktigt att SKB får ta ställning till den superplasticerare som betongentreprenören tänkt använda så att dess lämplighet kan bedömas.

I en studie som genomfördes på Kungliga Tekniska högskolan (KTH) kring sorptionspåverkan hos nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedlet UP2 undersöktes sorption av nickel(II) och europium(III) på cement i närvaro av nedbrytningsprodukter från UP2 under förvarsliga förhållanden (Tasdigh 2015). UP2 består framför allt av PAN. Studien visade höga bildade halter av nedbrytningsprodukter från filterhjälpmedlet och att sådana höga halter minskade sorptionen av Eu(III) samt att lösligheten av Ni(II) ökade. I motsats till denna studie av UP2 har tidigare studier av nedbrytningsprodukter av PAN visat att de inte i någon nämnvärd utsträckning påverkar sorptionen av Eu(III) (Dario et al. 2004, Duro et al. 2012).

Ytterligare studier av filterhjälpmedlet UP2 påbörjades 2020 inom ramen för Cement–Organics–Radionuclide interactions (CORI), ett arbetspaket inom Eurad. Preliminära resultat visar att nedbrytning av UP2 under reducerande förhållanden vid pH 12,5 är initialt långsam, men blir relevant efter ungefär 800 dagar (Gaona et al. 2021). Vidare visades att de höga halterna av nedbrytningsprodukter från UP2 i Tashdigh (2015) kraftigt överskattats på grund av användning av acetatfilter som ger stort utslag på uppmätt halt löst organiskt material. Detta kunde storleksordningsmässigt reproduceras av Gaona et al. (2021) och de använder därför genomgående oorganiska filter som ger uppmätta halter som stämmer överens med Duro et al. (2012).

Baserat på den förmodade nedbrytningsmekanismen av PAN har tre proxyligander identifierats av Gaona et al. (2021): glutarat, α -hydroxi-isobutyrat och 3-hydroxi-butyrat. En proxyligand är en känd ligand vilken kan mätas direkt, medan huvuddelen av nedbrytningsprodukterna kan anses att vara okända och därför inte kan mätas direkt. De identifierade proxyliganderna kan antas ha liknande reaktivitet som huvuddelen av nedbrytningsprodukterna och deras påverkan på lösligheten av Ca(II), Nd(III), Ni(II) och Pu(III/IV) studeras för närvarande. Preliminära resultat visar att påverkan är försumbar för Ca(II), Nd(III) och Pu(III/IV), medan lösligheten av Ni(II) ökar något. Generellt är löslighetspåverkan av de tre proxyliganderna betydligt mindre än vad den är med ISA. Preliminärt visar närvaro av proxyliganderna även en mycket svag effekt på Pu-sorption. Liknande experiment med Ni och Eu är pågående.

Program

- Molybden, selen och teknetium är viktiga för säkerhetsanalysen, men saknar robusta sorptionskoefficienter. Ett forskningsuppdrag, som syftar till att stötta inhemsk kompetens kring radionuklidsorption på cement, planeras att startas under Fud-perioden. K_d -värden för cement i närzonen ska experimentellt tas fram för Mo, Se och Tc, och sorptionsprocesserna ska modelleras för bättre processförståelse.
- Studien av nedbrytningen av filterhjälpmedlet UP2 har nyligen avslutats. De faktiskt bildade nedbrytningsprodukterna planeras att användas i kommande sorptionsstudier.
- Ytterligare studier av de tre proxyliganderna planeras för att fastställa deras påverkan på radionuklidsorptionen.
- SKB delfinansierar och deltar aktivt i PAN-forskningsprojektet inom CORI. SKB följer också CORI i stort genom deltagande i årsmöten och granskning av årsrapporter.
- SKB kommer att i god tid innan byggstart av SFR-utbyggnaden och SFL ta ställning till den superplasticerare som betongentreprenören tänkt använda så att dess lämplighet kan bedömas.
- SKB planerar inte i nuläget att fortsätta studera påverkan av nedbrytningsprodukter från cellulosa och superplasticerare på sorptionen av radionuklider. SKB kommer dock fortsatt att följa kunskapsläget.

6.2 Gasbildning

Gasproduktion i slutförvarsmiljö kan leda till en tryckupbyggnad och efterföljande påverkan på barriärernas funktion. Om gasproduktionen är så omfattande att den bildade gasen inte kan ledas ut på ett kontrollerat sätt, kan gastrycket pressa ut radionuklidhaltigt vatten och i värsta fall skada barriärer i slutförvaret. Det är därför viktigt att förstå de nedbrytningsprocesser som leder till gasproduktion för att kunna ansätta realistiska parametervärden i analysen av säkerhet efter förslutning och för att kunna ställa krav på avfallens innehåll. Gasproduktion beror huvudsakligen på nedbrytning av material genom till exempel korrosion, mikrobiella processer eller strålningspåverkan. Anaerob korrosion av aluminium och zink i avfall kan under kort tid bilda stora mängder vätgas och det är därför viktigt att kvantifiera korrosionshastigheten för zink och aluminium i slutförvarsmiljö.

Nuläge

SKB har tillsammans med forskare på KTH studerat korrosion av aluminium och zink som gjutits in i betong och utsatts för syrgasfritt artificiellt grundvatten. I den nu avslutade studien genomfördes en serie försök med olika exponeringstider (2, 4, 12, 52 och 104 veckor) (Herting och Odnevall 2021).

För både zink och aluminium visades korrosionen initialt vara snabb, men när systemen når ett jämviktstillstånd avtar korrosionshastigheten. Som förväntat korroderar aluminium snabbare än zink. Korrosionsrater för betongingjuten aluminium och zink utsatt för artificiellt grundvatten ligger efter 104 veckor runt 100 µm/år respektive 1 µm/år. När det gäller aluminium bildas ett tomrum, framför allt ovanpå metallen, men också runtomkring, vilket tillskrivs vätgasutvecklingen. Det kan även bildas sprickor i betongen på grund av den volymökning som bildandet av korrosionsprodukter innebär. Sprickbildning kunde inte observeras för zink. Korrosionsrater för aluminium och zink i artificiellt grundvatten utan betongkringgjutning, ligger i samma storleksordning som resultat från försök utförda på ingjutna prover. Det innebär att korrosionsprodukter på metallytor är hastighetsbegränsande och inte deras diffusion genom betongbarriären.

Program

- Korrosionen av aluminiumlegeringar, exempelvis i reaktortanken från Studsvik, samt korrosionen av andra metalliska material kan bli aktuella för vidare studier under Fud-perioden.
- SKB planerar i nuläget inte för fortsatta studier av anaerob korrosion av aluminium och zink, eftersom redan publicerade studier (till exempel Fujiwara et al. 2017) ger tillräckligt information. SKB kommer dock fortsatt att följa kunskapsläget.

6.3 Svällning av jonbytmassor

I likhet med gasproduktionen kan svällande avfall också påverka betongbarriärers integritet och därmed uttransporten av radionuklider från SFR. Det är därför viktigt att kvantifiera hur stora svälltryck som svällande avfall kan ge upphov till och att ställa krav på avfall för att undvika avfallsformer som riskerar att skapa alltför höga svälltryck.

Nuläge

Det är känt att bitumenkonditionerade hygroskopiska material, som till exempel torkade jonbytmassor och indunstarkoncentrat, kan ta åt sig vatten och därigenom svälla. Med vilken hastighet detta sker och hur svälltrycket utvecklas med tiden beror bland annat på förhållandet mellan ingående material, bitumensort, typ av jonbytmassa, jonbytmassans tvärbindningsgrad, ingående salters löslighet, partikelstorlek och i vilken utsträckning som den initiala svällningen kan ske fritt.

Kompletterande undersökningar har utförts, både av SKB och på uppdrag av SKB, i syfte att minska osäkerheterna kopplade till svällning och svälltryck. För att uppnå syftet behöver dock ytterligare undersökningar utföras. Försök med konditionerad jonbytmassa försvåras av att återmättnad av bitumenkonditionerad jonbytmassa tar mycket lång tid och även är mottrycksberoende.

Program

- SKB avser att genomföra nya försök och beräkningar för att bättre förstå och kunna beskriva svällning av bitumenkonditionerat avfall under slutförvarsliknande förhållanden, för att därigenom minska osäkerheterna kopplade till svällande avfall och svälltryck i SFR.

6.4 Radionuklidinventarium

SKB arbetar löpande med att förbättra metoder för uppskattning och prognos av radionuklidinventariet i det låg- och medelaktiva avfallet. Allteftersom kunskapsläget förbättras uppdateras och kompletteras beräkningen av referensinventariet.

SKB:s arbete med att förbättra uppskattningen av radioaktivitet i låg- och medelaktivt avfall fokuseras främst på de nuklider som i säkerhetsanalyser visat sig ha störst påverkan på den radiologiska risken efter förslutning. De flesta av dessa nuklider hör till kategorin svärmätbara nuklider. Med svärmätbara nuklider avses de nuklider vars aktivitet inte rutinmässigt kan mätas direkt på avfallskollin.

Vissa svärmätbara nuklider kan mätas rutinmässigt i prov från till exempel processvatten hos avfallsproducenterna. För mätning av andra svärmätbara nuklider krävs däremot omfattande koncentrerings och provberedning samt avancerade analyser vid externa laboratorier. På grund av detta blir tillgången på uppmätta värden för dessa nuklider begränsad.

Eftersom uppmätt aktivitet för svärmätbara nuklider i låg- och medelaktivt avfall endast finns som indirekta mätningar eller som analyser av enskilda prov, är det nödvändigt att tillämpa beräkningsmodeller i uppskattningar av radionuklidinventariet. För att det beräknade inventariet ska vara tillförlitligt krävs, att beräkningsmodellerna så långt som möjligt bygger på etablerade fysikaliska samband samt att antaganden och parametrar i modellerna kan verifieras med uppmätta värden. Fysikaliskt rimliga modeller är också en förutsättning för att kunna extrapolera data för svärmätbara nuklider till äldre avfall som producerats när tillgången på uppmätta värden var mer begränsad. Modellerna anpassas och verifieras, dels mot uppmätt aktivitet för svärmätbara nuklider, dels mot mer omfattande mätdatamängder för relaterade nuklider som är lättare att mäta.

SKB:s fortsatta arbete med svärmätbara nuklider innefattar utökad mätning av dessa, såväl som vidareutveckling av de beräkningsmodeller som används för att uppskatta radionuklidinventariet. Vidare arbetar SKB också med att, genom utökade mätningar och insamling av processdata från avfallsproducenterna, förbättra uppskattningen av osäkerheter i såväl uppmätt som beräknad aktivitet.

6.4.1 Referensinventarium

Nuläge

SKB och reaktorinnehavarna, med pågående nedmontering och rivning av kärnkraftsreaktorer, har regelbundna avstämningar i syfte att informera varandra om pågående arbeten och utbyta erfarenheter. SKB har sedan Fud-program 2019 författat en promemoria (Ahlford 2021) för att förtydliga förväntningarna rörande aktivitetsbestämningen i avfall från nedmontering och rivning. Dessutom har en mall tagits fram för regelbunden rapportering av avfallsprognoser för rivningsavfallet. Därmed kan SKB löpande uppdatera inventariet i takt med att reaktorinnehavarna genomför utredningar, beräkningar eller mätprogram med syfte att karakterisera rivningsavfallet. SKB har även påbörjat utvecklingen av system så att information från radiologisk kartläggning ska kunna tas emot inför nedmontering och rivning.

Arbetet med att karakterisera det historiska avfallet som avses att slutdeponeras i det kommande SFL pågår och har detaljerats av AB SVAFO. Karakteriseringen är ett nödvändigt steg i att uppdatera referensinventariet för SFL inför kommande ansökan om att få bygga detta slutförvar, eftersom det idag finns en osäkerhet kring avfallets innehåll av såväl material som radionuklider. SKB och AB SVAFO har sedan slutet av 2019 haft regelbundna avstämningar för att planera och strukturera karakteriseringsarbetet samt utveckla en handlingsplan avseende vilken information som i ett första skede behöver samlas in för de olika avfallsfraktionerna.

Program

- Begära in löpande uppdateringar av avfallsprognoser för rivningsavfallet och att regelbundet följa upp dessa med radionuklidtransportberäkningar (beräkningsmodell från PSAR för SFR). Dessa beräkningar utgör ett viktigt underlag i SKB:s bedömning av huruvida förändrade prognoser för inventariet inryms i den pågående tillståndsprövningen för utbyggnaden av SFR.
- Fortsätta bevaka resultaten från provanalyser av segmenterade interndelar och reaktortankar för att kunna uppdatera uppskattningen av inducerad aktivitet i låg- och medelaktivt avfall.
- Likforma inventarieberäkningar för rivningsavfallet med de beräkningar som görs för driftavfallet.
- Påbörja arbetet med översyn av SFL-inventariet, vilket bland annat innebär att inhämta och uppdatera inventariet med den senaste informationen. Mer konkreta insatser, såsom karakterisering av specifika avfallsfraktioner (exempelvis styrtavar), kommer också att utföras inom ramen för arbetet.
- Stötta AB SVAFO med löpande rådgivning och vägledning, bland annat genom uppföljande radionuklidtransportberäkningar för SFL-inventariet med hjälp av den beräkningsmodell som utvecklats inom säkerhetsvärderingen för SFL. Beräkningar görs när uppdaterad information avseende radionuklidinnehållet finns framtagen för en specifik avfallsfraktion för att kunna besvara huruvida karakterisering och hanteringsstrategi kan bedömas som tillräcklig för den aktuella fraktionen.

- Fortsätta bevaka planeringen av kommande kärntekniska anläggningar i Sverige för att fortlöpande kunna ta ställning till möjligheten att slutförvara avfall från drift och avveckling av anläggningen.

6.4.2 Metodutveckling för svärmätbara nuklider

Nuläge

För att möjliggöra vidareutveckling av beräkningsmodeller för såväl framtagande av källtermer som aktivitetsbestämning av svärmätbara nuklider har SKB samlat in tillgänglig drift- och mätdata för samtliga svenska reaktorer sedan driftstart, och under 2021 har en databas för dessa data upprättats.

SKB har sedan Fud-program 2019 utvecklat en beräkningsmodell för bestämning av molybden-93 i driftavfall. Modellen omfattar i nuläget BWR-reaktorer och beskriver korrosionsavlossningen från molybdenlegerade bränslespridare samt korrosionsavlossning från andra molybdeninnehållande hårdkomponenter som utsätts för tillräckligt höga neutronflöden för att aktiveras. Även för driftavfall från Clab har metodiken uppdaterats med avseende på molybden-93, där resultat från verifierande mätningar ligger till grund för den uppdaterade uppskattningen.

SKB har tillsammans med reaktorinnehavarna utfört verifierande mätningar av de svärmätbara nukliderna Mo-93, Tc-99, I-129 och Cs-135. Uppkoncentrerade prover från reaktorvatten respektive bassängvatten (Clab) samlades under 2019 och 2020 och skickades till Risø-laboratoriet för analys. Mellan de två provtagningskampanjerna utvecklades metoden för provberedning av Mo-93 vidare av det anlitate laboratoriet, vilket resulterade i att även denna nuklid kunde detekteras i proverna från den andra kampanjen. Gammamätning och elementanalys gjordes i anslutning till provtagningsarna, så att mängden svärmätbara nuklider kunde relateras till relevanta lättmätta nuklider respektive uppmätt metallhalt i proverna.

SKB har även genomfört enstaka, kompletterade mätningar av svärmätbara nuklider eller element-sammansättning när material har funnits tillgängligt på laboratorium, exempelvis när prover har skickats för analys inom ramen för de olika RKL-projekten (radiologisk kartläggning). Dessa mätningar syftar till att öka mekanismförståelsen avseende olika ämnens spridning i reaktorsystemen och ger viktigt underlag för de insatser som görs inom modellutvecklingen för svärmätbara nuklider.

Program

- Årligen uppdatera och komplettera den databas som SKB upprättat för reaktorernas drift- och kemidata samt använda dataunderlaget för att parametrisera och verifiera beräkningsmodeller för svärmätbara nuklider. I arbetet ingår också att med hjälp av dataunderlaget förbättra osäkerhetsanalysen för dessa nuklider.
- Fortsätta utvecklingen av beräkningsmodeller för att kvantifiera mängden svärmätbara nuklider i driftavfall. Detta inkluderar primärt en vidareutveckling av modellen för molybden-93 så att den även omfattar PWR-reaktorer, men även utveckling av källtermsmodeller för crud respektive bränsleskador.
- Komplettera källtermsmodellerna så att samtliga svärmätbara nuklider i driftavfall från de svenska kärnkraftsreaktorerna inkluderas, där mätvärden från redan etablerad aktivitetsbestämningsmetodik (såsom regelbunden mätning av ett antal transuraner) utnyttjas för verifiering och uppskattning av osäkerheter.
- Fortsätta arbetet med att ta fram en förbättrad modell för beräkning av inducerad aktivitet i mellanlagrade styrtstavar genom att använda borutbränningsdata och annan drifthistorik för att kunna ge en mer detaljerad bild av bestrålningshistoriken. Beräkningarna kommer också att användas som stöd vid radiologiska bedömningar rörande den fortsatta hanteringen av styrtstavarna fram till deponering i SFL när det gäller exempelvis dimensionering av strålskärm för hanteringen, men också för att kunna fatta beslut om slutförvaringen.
- Samla in neutrontransportmodeller för respektive reaktor för att möjliggöra framtida uppdateringar av aktivitetsberäkningar.
- Förbättra tillförlitligheten i hur uppmätta och beräknade aktivitetsmängder i system hos avfallsproducenterna fördelas per kolli genom att i högre utsträckning inhämta och tillämpa information som ökar möjligheten att spåra avfallskollin till de system där avfallet uppstår.

- Tillsammans med reaktorinnehavarna utföra ytterligare mätningar av molybden-93.
- Utforma program för provtagning av de styrtavar som finns mellanlagrade i Clab i samband med hantering av dessa, för att verifiera och justera den beräkningsmodell som tas fram i syfte att bestämma radioaktiviteten i styrtavarna.
- Utföra kompletterande analyser för ökad mekanismförståelse.
- Ta fram ett förbättrat dataunderlag för osäkerhetsanalys med hjälp av utökade verifierande mätningar av svärmätbara nuklider.

6.5 Acceptanskriterier för avfall i SFL och det utbyggda SFR

I dagsläget mellanlagras en betydande mängd långlivat avfall hos avfallsproducenterna och ytterligare långlivat avfall kommer att uppstå under fortsatt drift och rivning av de kärntekniska anläggningarna. För att undvika att kommande transporter och slutförvaring försvåras, behöver det tydliggöras hur det långlivade avfallet ska hanteras och karakteriseras samt vilka krav som, redan idag, kan ställas på avfallet.

För avvecklingsprojekten finns också ett behov av tydliga förutsättningar för hur det kortlivade rivningsavfallet ska hanteras för att avfallet så långt som möjligt ska överensstämma med acceptanskriterier för slutförvaring i det utbyggda SFR.

För att kunna ta ställning till om avfallet som avfallsproducenterna producerar karakteriseras i tillräcklig utsträckning för att uppfylla säkerhetskraven i ett kommande slutförvar, finns således ett behov av att redovisa acceptanskriterier för slutförvaring i både SFL och i det utbyggda SFR. I takt med att detaljerna kring förvarens utformning konkretiseras kommer också kravbilderna att kunna preciseras.

Nuläge

SKB har under den gångna Fud-perioden påbörjat framtagningen av acceptanskriterier för avfall till BHK i SFL. Resultaten från SFL säkerhetsvärdering ligger till grund för härledning av krav som berör säkerhet efter förslutning.

Acceptanskriterier för avfall som ska slutförvaras i utbyggt SFR lämnades in i samband med ansökan om utbyggnad av SFR. SKB har under den gångna Fud-period vidareutvecklat acceptanskriterierna för avfall till utbyggt SFR och tagit fram och härlett acceptanskriterier för avfall till samtliga nya förvarsdelar. Kriterierna baseras på den senaste kunskapen om förvarets och transportsystemets utformning samt den analys av säkerhet efter förslutning som ingick i F-PSAR. Dessa acceptanskriterier ingår i PSAR och kommer sedan att utvecklas vidare utifrån resultaten från analysen av säkerhet efter förslutning i PSAR.

Program

- Fortsatt utveckling av acceptanskriterier för slutförvaring av avfall i SFL, både till BHK och till BHA. En första version av preliminära acceptanskriterier för de båda förvarsdelarna kommer att tas fram under Fud-perioden. Krav som kopplar mot säkerhet efter förslutning av SFL härleds, i den första versionen, från den genomförda säkerhetsvärderingen och kommer att utvecklas i takt med att säkerhetsanalysen för SFL utvecklas. Krav som kopplar mot driftverksamheten i SFL tas fram i samband med F-PSAR och vidareutvecklas i takt med att utformningen av anläggningen utvecklas. Exempel på utredningar som kommer att genomföras i anslutning till framtagning av acceptanskriterierna är krav på emballage, se avsnitt 6.6.
- Fortsatt utveckling av acceptanskriterierna för slutförvaring av avfall i utbyggt SFR, baserat på resultaten från säkerhetsanalysen i PSAR, planeras under Fud-perioden. En harmonisering kommer att göras av acceptanskriterierna för utbyggt SFR så att de följer samma struktur som acceptanskriterierna för befintligt SFR. Inför SAR för provdrift kommer acceptanskriterierna för avfall till utbyggt SFR att inarbetas i acceptanskriterierna för avfall till befintligt SFR.

6.6 Avfallsbehållare och avfallstransportbehållare

För att kunna genomföra avvecklingen av de kärntekniska anläggningarna på ett optimalt sätt behöver behovet av utvecklingsarbete avseende på avfallsbehållare och avfallstransportbehållare för det låg- och medelaktiva avfallet löpande följas upp.

6.6.1 Avfallsbehållare

Nuläge

Arbete kring avfallsbehållare har under den gångna Fud-perioden fokuserat på befintliga typer av avfallsbehållare och att värdera huruvida dessa kan användas i olika bergssalar och slutförvar. Exempelvis har strategin för tillämpandet av avfallsbehållare i bergssalen för reaktortankar (1BRT) i utbyggt SFR renodlats till att i huvudsak hantera avfallsbehållare av kokillformat, vilket möjliggör en effektiv hantering.

Även för slutförvaret SFL har arbete initierats där lämpligheten hos befintliga typer av avfallsbehållare utvärderas. Detta genomförs med utgångspunkt från det avfall som planeras att deponeras och den kravbild som förväntas bli gällande för långlivat avfall.

En studie har bedrivits för att, ur ett BAT- och Alara-perspektiv, analysera lämpligheten hos olika avfallsbehållare kopplat till hantering av BWR-styrstavar. Studien omfattade bland annat ett tidigt koncept för avfallsbehållaren långkokill. Den föreslagna utformningen av långkokillen bedömdes dock inte kunna uppfylla gällande krav med avseende på strålsäkerhet, transporterbarhet och mellanlagring.

Program

- SKB kommer löpande bevaka behovet av ny- eller vidareutveckling av ändamålsenliga avfallsbehållare till befintliga och kommande slutförvar.
- Under Fud-perioden planeras ett projekt som ska undersöka möjligheten att utforma och använda en tät behållare till slutförvaret SFL.

6.6.2 Avfallstransportbehållare

Avfallstransportbehållare syftar till att möjliggöra säker och effektiv transport av avfall från avfallsproducenterna till nya mellanlager eller slutförvar. Behovet av avfallstransportbehållare styrs av val av avfallsbehållare och kapacitetsbehovet.

Nuläge

Befintliga avfallstransportbehållare ATB12K (avsedd för tolv enkokiller) och ATB3T (avsedd för tre tankar) är uppdaterade till förpackningsklasserna Typ A och IP-2, vilket ökar transportkapaciteten för dessa behållare. En ombyggnation av ATB16K (tidigare avsedd för 16 enkokiller) till förpackningsklasserna Typ A och IP-2 pågår, vilket kommer att möjliggöra att både en stål- eller betongtank, eller två stycken tvåkokiller, kan transporteras.

Program

- I samarbete med amerikanska Holtec International Power Division Inc. utveckla en ny avfallstransportbehållare, ATB1T, för transport av ståltankar med högre aktivitet. Den nya avfallstransportbehållaren planeras att certifieras och driftsättas under Fud-perioden.
- Behovet av modifiering av befintliga behållare för att inrymma en annan avfallstyp än vad de ursprungligen var avsedda för, samt om en annan förpackningsklass kan bli aktuell, kommer att ses över inför kommande rivningsavfall.

7 Använt kärnbränsle

Den totala mängden använt kärnbränsle kommer enligt planeringsförutsättningarna (avsnitt 1.1) att motsvara cirka 6 000 kapslar i Kärnbränsleförvaret. En kapsel innehåller cirka två ton bränsle. Mängden använt kärnbränsle anges som den mängd uran som ursprungligen fanns i bränslet. I den mängd använt kärnbränsle som ska deponeras i Kärnbränsleförvaret ingår, förutom allt använt bränsle från dagens svenska kärnkraftverk, även bränsle från Ågestareaktorn, bränslerester från provningsprogram i Studsvik samt ett antal bränsleelement med så kallat Mox-bränsle (Mixed oxide fuel). Dessa tillkommande bränsletyper utgör en mycket liten del av den totala mängden. Cirka 20 ton använt kärnbränsle från Ågestareaktorn samt cirka tre ton använt kärnbränsle från Studsvik Nuclear AB:s undersökningsverksamhet mellanlagras idag i Clab. Dessutom ingår ett antal läckande bränslestavar, motsvarande totalt 1,4 ton bränsle, vilka placeras i speciella täta behållare för förvaring i Clab och senare deponering i Kärnbränsleförvaret. I Clab lagras även 23 ton Mox-bränsle som har erhållits från Tyskland i utbyte mot det bränsle som i ett tidigt skede av det svenska kärnkraftsprogrammet sändes till La Hague i Frankrike för upparbetning.

SKB:s program avseende hantering av bränsle omfattar flera delar, från krav på information om bränslets egenskaper innan det används i bränslecykeln till att utforma ett program för kärnämneskontroll som är internationellt godkänt. I detta kapitel beskrivs det utvecklingsarbete som genomförs och planeras inom dessa områden. Utveckling av kärnämneskontroll är ett område där SKB:s utveckling sker i nära samarbete med internationella organ.

Om en kapsel i Kärnbränsleförvaret skulle bli otät och vatten tränga in, är bränslets egenskaper avgörande för hur snabbt radioaktiva ämnen frigörs. Resultat från tidigare säkerhetsanalyser visar att den hastighet med vilken radionuklider frigörs från bränslets olika delar signifikant påverkar analysen av Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning. En fördjupad förståelse för mekanismen för upplösning av bränslematrisen behövs för att stödja tolkningen av de experimentella resultaten.

7.1 Icke-reguljära bränslen och bränsleintegritet

Med icke-reguljärt bränsle avses bland annat bränsle från Ågestareaktorn, bränslerester från provningsprogram i Studsvik, Mox-bränsle samt skadat bränsle.

Bränslets integritet har betydelse för inkapslingsanläggningen, då hanteringen av bränsleelementen i Clink måste kunna ske på ett förutbestämt sätt. Därför följer SKB åldring av kärnbränsle i Clab, från kärnkraftverk och industrin i övrigt samt rön från internationell forskning. Vid Clab inspekteras ett antal individuella bränsleelement regelbundet för att följa förändringar i deras egenskaper under mellanlagring. Då hanteringen i Clab sker i vattenfyllda bassänger är inspektion av elementen förhållandevis enkel, till skillnad från vid torrlagring i kapslar där sådan inspektion inte är möjlig på ett enkelt och kontinuerligt sätt. För erfarenhetsåterföring upprätthålls kontakt även med bränsleleverantörer samt andra anläggningar med erfarenhet av mellanlagring.

Nuläge

En kampanj för att tömma de svenska kärnkraftverken på skadat bränsle genomfördes under perioden 2015–2020. Bränslet består av urandioxidkutsar omslutna av kapslingsmaterial. Kapselmaterialet kan skadas och för att återupprätta den barriärfunktion som det är tänkt att utgöra under driften av de anläggningar där bränsle hanteras, har det skadade bränslet behandlats så att det inte behöver vidare behandling före slutförvaring. Skadat bränsle med otät kapsling kallas även läckande bränsle.

SKB har använt två olika metoder för omhändertagande av läckande bränslestavar. Båda metoderna innebär att det skadade bränslet placeras i behållare med dimensioner av PWR- eller BWR-bränsle. Dessa behållare är vattentäta och ersätter därmed den skadade kapslingen. Den ena metoden är utvecklad av Westinghouse och kallas Quiver. Den har utvecklats för användning i kärnkraftverkens bassänger. Den andra metoden har utvecklats av Studsvik och innebär att de läckande bränslestavarna skickas till Studsvik där de kapslas in i täta hylsor, för vidare transport till Clab.

Existerande dokumentation visar att det finns ett mindre antal bränsleelement med läckande bränslestavar i Clab. Hur detta ska hanteras, och hur det påverkar den kemiska miljön i kapseln under de första åren efter inkapslingen, har utretts (Spahiu 2021). De modeller som använts för att beräkna hur oxidanter bildas och konsumeras i en försluten kapsel i närvaro av vatten, luft och argon (Jonsson 2021, Henshaw och Spahiu 2021) visar att järnkorrosion i kapseln snabbt konsumerar kvarvarande vatten samt att anoxisk järnkorrosion bildar vätgas och ammoniak. Modelleringsinsatserna ligger till grund för strategin för omhändertagande av det läckande bränslet i Clabs bassänger och utgår från en optimering av största möjliga nytta avseende minskning av riskbidraget till säkerhet efter förslutning och minskning av risken för personal vid bränslereparationer.

Det långsiktiga inspektionsprogrammet, som utgör en del av åldringsprogrammet, omfattar bland annat Mox-bränsle från Tyskland och bränsle från Ågestareaktorn. Resultatet från programmet har hittills inte visat på några pågående åldringsfenomen hos dessa bränslen. Dessutom har provkuponger av borerat rostfritt stål och av rostfritt stål, av samma sort som används i bärande delar i bränsleelement, studerats. Spalter och svetsar i dessa provkuponger har undersökts med metallografisk provning och ljusoptisk mikroskopi och ingen korrosion har kunnat konstateras.

Via Vattenfalls samarbete med Electric Power Research Institute, Inc (EPRI) har SKB numera tillgång till erfarenheter rörande bränsledegradering från EPRI:s databas inom bränslerelaterade frågor.

Studier av skadat bränsle har påbörjats på Studsvik under den gångna Fud-perioden. Syftet är att öka kunskapen om denna typ av icke-reguljärt bränsle så att det kan hanteras mindre konservativt i analysen av säkerhet efter förslutning. Trots att det rör sig om en relativt ringa mängd, ger den en märkbar negativ effekt på säkerhetsanalysen, eftersom delar av det skadade bränslet löser upp sig mycket snabbare än intakt bränsle. Vissa delresultat från dessa studier har rapporterats, men eftersom undersökningarna fortsätter förväntas publicering av resultat i öppen litteratur först under denna Fud-period. En annan undersökning som syftar till att bättre beskriva hur bränsle med skadad kapsling påverkas av längre tids vattenkontakt, till exempel under lagring i Clab, har genomförts på gammalt bränsle som ingår i experimentet "Serie 3" på Studsvik. Resultaten beskrivs närmare i avsnitt 7.7.

För att kunna bedöma vilket riskbidrag skadat bränsle ger till analysen av säkerhet efter förslutning, har en uppskattning gjorts av hur snabbt den oxiderade fraktionen av bränslet löser upp sig i förvarsmiljö. Uppskattningen är baserad på redan publicerade vetenskapliga studier (Evins och Hedin 2020).

Inom EU-projektet DisCo studerades både skadat bränsle och Mox-bränsle. Optisk mikroskopi på bränsle från en gammal gasreaktor, vilket legat i en bassäng i Sellafield i cirka 40 år, visade förvånansvärt liten påverkan (O'Neill et al. 2019). Fler undersökningar planerades för att bekräfta detta, men blev försenade på grund av covid-19-pandemin. Använt Mox-bränsle studerades vid två laboratorier i Tyskland (KIT-INE och JRC Karlsruhe), medan obestrålat Mox-bränsle med hög halt plutonium studerades i Frankrike. Resultaten visar att använt Mox-bränsle löser upp sig på liknande sätt och med liknande hastigheter som reguljärt uranoxidbränsle (Herm et al. 2020) samt att en syrefri slutförvarsmiljö med korroderande järn håller även obestrålat Mox-bränsle med hög alfastrålning reducerat (Kerleguer et al. 2020).

Program

- En systematisk sammanställning av status för bränsletyper med svaghet i konstruktionen kommer att genomföras, då dessa typer kan medföra problem vid hantering.
- Ett projekt har startat som ska ge större kunskap om olika degraderingsmekanismer i bränsle och strukturmaterial som en följd av dess hantering under bränslets hela livscykel. Speciellt kommer projektet att titta på Ågestabränslet och Mox-bränslet.
- Uppdatering av åldersprogrammet för kärnbränsle som en följd av pågående arbete med att genomlysna degraderingseffekter.
- Uppföljning av erfarenheter från driften av kärnkraftverken i Sverige och internationellt via deltagande i internationella konferenser, såsom IAEA:s grupper för samverkan och det nya OECD/NEA-projektet Scip VI (Studsvik cladding integrity project). Genom kontakt med representanter för de svenska kärnkraftverken samt kärnkraftsindustrin i Sverige och internationellt, erhålls även erfarenheter av hantering av kärnbränslet.

- Utveckling av modell för radiolys av kvarvarande vätskor och gaser i en försluten kapsel planeras för att stödja arbetet med krav på torkningsprocess och bränslehantering.
- Studier av bränsleprov, vilka genomgått lakning i syresatta miljöer, planeras med Studsvik för att undersöka hur oxidationen påverkat urandioxidmatrisen. Proven inkluderar dopat bränsle samt de bränsleprov som lakats i cirka 37 år i syresatt vatten ("Serie 3").
- Fortsatta studier av skadat bränsle som finns på Studsvik planeras för att öka kunskapen om hur detta bränsle påverkats av vattenkontakt i reaktorn och vid den efterföljande bassängförvaringen.
- Undersökningar av olika mindre fraktioner av icke-reguljärt bränsle planeras i syfte att fastställa egenskaper, krav och bidrag till risk i analysen av säkerhet efter förslutning.

7.2 Bränslekaraktisering, resteffekt och strålning

Resteffekten från bränslet är en central parameter som måste vara känd vid de olika stegen i kärnbränslecykeln, såsom transport, mellanlagring, inkapsling och slutförvaring, då den ger upphov till temperaturhöjningar. Ofta utgör resteffekten den begränsande faktorn för hur mycket bränsle som kan placeras i transportbehållare, lagringsbassänger respektive kopparkapsel, vilket gör att den har en betydande driftmässig, säkerhetsmässig och ekonomisk betydelse på både kort och lång sikt (Sjöland 2020).

Vid bränslekaraktisering används all relevant tillgänglig information i form av bränslets egenskaper och drifhistorik, beräkningskoder och mätningar. Bränsleelementets radionuklidinventarium beräknas, och utifrån detta kan bränslets multiplicitet (kopplat till kriticitet), strålningsfält och resteffekt tas fram. Dessutom bestäms bränslets innehåll av fissila ämnen, vilket gör att bränslet kan verifieras avseende kärnämneskontroll. Det finns krav på att alla bränsleelement måste verifieras före inkapsling, vilket är planeringsförutsättningen för utveckling av förståelse, metoder, beräkningskoder och mätinstrument. Kärnbränsleförvaret är speciellt så till vida att bränslet inte längre kan inspekteras. Sista gången detta är möjligt är i samband med inkapslingen.

Nuläge

Den andra av tre faser av ett bränslekaraktiseringsprojekt avslutades 2021. Här har metoder och instrument, bland annat detektorer, utvecklats för att kunna användas i inkapslingsanläggningens mätstation för bränslet (Perrey et al. 2021, Bengtsson et al. 2022, Favalli et al. 2016, Jansson et al. 2020a, b).

I projektet har ett stort antal mätningar gjorts för den uppsättning bränslen som kallas SKB-50. Uppsättningen omfattar 25 PWR- och 25 BWR-bränslen som karakteriserats på ett flertal sätt, till exempel kalorimetriskt (med kalorimetern i Clab) och genom gamma- och neutronmätningar. SKB-50 utgör en internationell benchmark, som också används i EU-programmet Eurad i samarbete med amerikanska forskningsinstitut, i aktiviteter inom NEA samt EPRI-samarbete.

De av Los Alamos National Laboratory utvecklade metoderna Differential Die-Away Self-Interrogation (DDSI) och Differential Die-Away (DDA) (Thompson et al. 2022, Trelue et al. 2021, Trahan et al. 2020) har testats med gott resultat i fullskala i Clab. Metoderna utgör en viktig grund för karakteriserings-systemet i Clink, framför allt inom validering kopplat till kärnämneskontroll (Lindgren et al. 2019).

Ett blindtest, med syfte att jämföra koder för och mätningar av resteffekt, har genomförts i samarbete med OECD/NEA och cirka 25 internationella organisationer med i stort sett samtliga koder för beräkning av bränsleegenskaper i världen. Resultat från de olika koderna har jämförts sinsemellan och med kalorimetriska resteffektdata, där deltagarna endast fått basal driftinformation för fem olika använda kärnbränslen (Jansson et al. 2022a). Slutsatserna från blindtestet visar att mer och bättre experimentella data skulle möjliggöra bättre bestämning av resteffekt. Det blev även tydligt att detaljeringsgraden på driftdata för bränslet, liksom de förenklingar som görs, påverkar resultaten av resteffektberäkningarna, något som behöver studeras ytterligare framöver.

Viktiga frågor kopplat till resteffekt är vilka temperaturer som uppnås i olika delar av KBS-3-systemet. Temperaturen är ofta gränssättande för exempelvis hur mycket bränsle som kan placeras i en kapsel eller transportbehållare och har stor påverkan på möjligheten att optimera KBS-3-systemet. Kapaciteten att utföra termisk modellering inom SKB har stärkts.

Inom strålningsområdet har bränslets strålning och dess påverkan på materialegenskaper hos barriärerna i slutförvaret utretts genom Monte Carlo-simuleringar av neutron- och gammastrålning från olika vanliga typer av BWR- och PWR-bränslen, utförda av Uppsala universitet (Jansson et al. 2022b). Se även avsnitt 8.1.4 om strålningens påverkan på kapseln.

SKB leder sedan 2019 arbetspaketet Spent Fuel Characterization (SFC) inom Eurad. SFC är uppdelat i fyra områden: 1) Administration och koordinering, 2) Bränsleegenskaper och relaterade osäkerhetsanalyser, 3) Bränslets beteende efter uttag ur reaktorn och 4) Olycksscenarioer och konsekvensanalyser. På webbsidorna <https://www.ejp-eurad.eu/> och <https://cordis.europa.eu/project/id/847593> beskrivs projektet i detalj (Hernandez-Solis et al. 2021, Papaioannou et al. 2020, Ma et al. 2020, Shama et al. 2021, Schillebeeckx et al. 2021, Király et al. 2021, Rochman et al. 2021).

Resteffektberäkningar för Clab och för transportsystemet görs med SNF-koden (Studsvik Nuclear Fuel) som tar hänsyn till bränslets verkliga historik. Detta verktyg har visat sig ge god överensstämmelse med mätningar. SKB har ett pågående samarbetsprojekt med EPRI, vilket syftar till att utöka och förbättra det valideringsunderlag som finns gällande resteffekt.

Program

- En ny fas (den tredje) i utvecklingen av bränslekaraktiseringsmetoder och instrument startas. Arbetet syftar till att ta fram industriellt tillämpliga metoder och bygga en fullskaleprototyp för karakterisering av bränsle inför inkapsling. Kommande testning och verifiering av metodiken planeras att genomförs i Clab. Projektet ska även ta fram verifieringsmetoder som passar icke-reguljära kärnbränslen, såsom bränsle från Ågestareaktorn och Mox-bränsle, samt de nya behållarna för hantering av skadat bränsle från kärnkraftsanläggningarna. Riktlinjer för vilka osäkerheter som måste associeras med bränsle där information saknas kommer att tas fram.
- Samordningen och harmoniseringen av frågor rörande kärnämneskontroll fortsätter utifrån den svenska policyn, vilken bland annat bygger på att SKB genomför omfattande mätningar av bränsleelementen före inkapsling, liksom på robusta övervakningssystem efter inkapsling fram till införsel i Kärnbränsleförvaret. Policyn beskrivs mer utförligt i af Ekestam et al. (2018).
- Inom området bränslekaraktisering fortsätter de väl etablerade samarbetena med olika internationella grupper och organisationer, inte minst samarbetet med U.S. Department of Energy (DOE) genom Los Alamos National Laboratory och Oak Ridge NL. I Sverige fortsätter samarbetena med Uppsala universitet och Lunds universitet (där SKB har en adjungerad professor).
- Fortsatt deltagande i SFC, vilket bidrar till utveckling och utvärdering av metoder för bränslemätning och bestämning av bränsleparametrar. Projektet pågår fram till 2024. Diskussioner om en fortsättning genom Eurad 2 sker på europeisk nivå.
- SKB kommer aktivt att delta i den nybildade arbetsgruppen rörande bestämning och utvärdering av resteffekt. Inom IAEA Coordinated Research Project (CRP) fortsätter projektet SFC under ordförandeskap av SKB.
- Termiska analyser i bränslets och kapselns närområde, inklusive transportbehållare, ska genomföras. Detta kommer också att innefatta utveckling av EPRI-benchmark för mätning av temperaturer på bränsleytan och analys av konservatism i beräkningar.
- Kapacitet att utföra egen termisk modellering har etablerats inom SKB, och modellering av olika fall relevanta för Sveriges back-end och KBS-3-systemet kommer att fortsätta under perioden. Kapselns temperaturutveckling beskrivs i avsnitt 8.2.4.
- Fortsatt arbete med EPRI rörande validering av resteffekt och ombyggnation av befintlig kalorimeter i Clab.

7.3 Bränsleinformation och optimering av val av bränsle för inkapsling

Bränslets sammansättning är utgångspunkten för alla de beräkningar av radioaktivitet, kriticitet, resteffekt och radionuklidinventarium som behöver göras för det bränsle som ska transporteras, mellanlagras och slutförvaras. För att kunna göra korrekta beräkningar behövs detaljerad information om bränslets geometri, material, initial anrikning och drifhistorik.

Detaljeringsgraden på den bränsleinformation som behövs för verifiering av bränslets egenskaper beror på vilka mätmetoder och krav på noggrannhet som krävs i de olika stegen av bränslets väg från kärnkraftverken till mellanlagring och slutförvaring i kapslar. Ju mer detaljerade bränsledata som kan erhållas, desto mer precisa beräkningar kan göras, vilket gör att påslag för olika typer av osäkerheter kan minimeras.

Nuläge

Under den gångna Fud-perioden har SKB arbetat med att identifiera och samla in den bränsleinformation som behövs inför hantering och slutförvaring i KBS-3-systemet. Arbetet har även innefattat kvalitetssäkring av den bränsleinformation som redan finns i databaserna. Detta har gjorts dels genom automatiserade jämförelser med data från kraftverken, dels genom att gå igenom bränsledokumentation från bränsleleverantörerna och kontrollera den mot databasens uppgifter.

För äldre bränsle innehåller dokumentationen i många fall mindre detaljerade data. I vissa fall finns inte heller detaljerad driftdata sparad hos kärnkraftverken. Riktlinjer behöver tas fram för vilka osäkerheter som ska associeras med sådana bränslen.

Den information om det använda bränslet som behövs för en säker hantering och slutförvaring omfattar detaljerad information om varje bränslelements drifhistorik, geometri, material och nukleär design (även axiell fördelning). Med denna information kan detaljerade beräkningar göras av till exempel nuklidinventarium, resteffekt och reaktivitet. För allt bränsle är det även av vikt att spara information om rekonstruktioner, skador och observerade svagheter i material, då dessa uppgifter behövs både för kärnämneskontroll och för den praktiska hanteringen i Clink. Denna insamling och kvalitetssäkring av bränsledata är även en del i det arbete som görs för att säkerställa bevarandet av viktig information för kommande generationer, se avsnitt 4.13.1.

Resteffekten i individuella bränsleelement påverkar hur urval av bränsleelement som ska placeras i en viss kapsel kan göras för att minimera det totala antalet kapslar (inkapslingsoptimering). Andra parametrar som måste tas med i analyser för att optimera antalet kapslar är inkapslingstakt, startdatum för inkapsling samt kravet på att minimera antalet förflyttningar av bränsle i mellanlagret. Val och placering av bränsleelement behöver göras under beaktande av kriticitet och strålnivåer på kapselns utsida. En algoritm och ett program för inkapslingsoptimering, baserat på tillgänglig bränsleinformation, kommer att tas fram av pågående projekt och resultatet kommer att finnas tillgängligt vid inkapslingstillfället.

Program

- Fortsätta arbetet med att samla in och kvalitetssäkra bränsleinformation från kärnkraftverk och bränsletillverkare.
- Olika beräkningsprogram kommer att kopplas till bränsledatabasen, så att beräkningar kan utgå ifrån kvalitetssäkrade data från kraftverken i stället för antagna data. Detta gäller beräkningar av radionuklidinnehåll, strålning, resteffekt och kriticitet.
- Utveckla och utvärdera algoritm för val av bränsleelement vid inkapsling.

7.4 Acceptanskriterier för bränsle

SKB tillämpar idag acceptanskriterier för mottagning och mellanlagring av bränsle i Clab i form av två så kallade krav- och kriteriedokument. Efterlevnad av kraven verifieras stegvis och processen för att göra detta finns beskriven i SKB:s ledningssystem. Acceptanskriterierna omfattar alla steg i vilka SKB hanterar bränslet, det vill säga kriterier avseende transport, mellanlagring, inkapsling och slutförvaring. Kriterierna baseras på de analyser av säkerheten som har gjorts för respektive steg. Genom acceptanskriterierna säkerställs att bränslet uppfyller de egenskaper som krävs för att det ska kunna omhändertas på ett säkert sätt i alla steg fram till slutförvaring och efter förslutning av Kärnbränsleförvaret.

Både för inkapslingen och för Kärnbränsleförvaret har ett flertal acceptanskriterier för använt kärnbränsle och kopparkapslar identifierats. I takt med att detaljerna kring anläggningarnas utformning konkretiseras och deras säkerhetsanalyser uppdateras, kommer också kraven att kunna preciseras.

SSM:s föreskrift (SSMFS 2021:7) om omhändertagande av kärntekniskt avfall omfattar bland annat krav på dokumentation av kärntekniskt avfall. För använt kärnbränsle är en del av dessa krav nya i och med SSMFS 2021:7. Det innebär att det finns behov av att utreda hur den samlade dokumentationen kring bränslet och kopparkapseln ska se ut för att uppfylla tillämpliga föreskriftskrav samt fylla övriga behov kring dokumentation som finns i verksamheten. Detta inkluderar även utformning av acceptanskriterier för överföring från mellanlagring till inkapsling samt för slutförvaring i Kärnbränsleförvaret.

Ändringsföreskriften SSMFS 2022:1 (till SSMFS 2008:1) anger att acceptanskriterier ska ingå i säkerhetsredovisningen enligt 4 kap. 2 § bilaga 2 SSMFS 2008:1. Då krav- och kriteriedokumentet, som idag utgör acceptanskriterier för mottagning av bränsle i Clab, inte omfattas av säkerhetsredovisningen för Clab har SKB ansökt om tidsbegränsad dispens för detta till 1 januari 2024.

Nuläge

Under den senaste Fud-perioden påbörjade SKB ett arbete med att sammanställa acceptanskriterier för mottagning och mellanlagring av bränsle i Clab, enligt samma struktur som används för acceptanskriterier i SFR samt införa dessa i säkerhetsredovisningen. Arbetet omfattar även att se över rutiner kopplade till acceptanskriterier, exempelvis avseende dokumentationen av härledningar, säkerhetsgranskning av acceptanskriterier och mottagningskontroll.

Ett branschgemensamt arbete inleddes under den gångna Fud-perioden inom Kärnkraftindustrins säkerhetskoordineringsgrupp (KSKG) för att utreda hur den samlade dokumentationen kring bränslet och kopparkapseln bör utformas för att uppfylla tillämpliga föreskriftskrav enligt SSMFS 2021:7 samt för att fylla de övriga behov kring dokumentation som finns i verksamheterna. Arbetet omfattar även att titta på kopplingen mellan acceptanskriterier och övrig dokumentation.

Program

- Fortsatt arbete med att sammanställa acceptanskriterier för mottagning och mellanlagring av bränsle i Clab enligt samma struktur som används för acceptanskriterier i SFR samt införa dessa i Clabs säkerhetsredovisning.
- Fortsatt branschgemensamt utredning av hur den samlade dokumentationen kring bränslet och kopparkapseln, inklusive koppling till acceptanskriterier, bör utformas för att uppfylla tillämpliga föreskriftskrav enligt SSMFS 2021:7 samt fylla de övriga behov kring dokumentation som finns i verksamheten.
- Sammanställa acceptanskriterier för de verksamheter som är planerade vid de kommande anläggningarna Clink och Kärnbränsleförvaret.

7.5 Kriticitet

För kriticitetsberäkningar tillämpar SKB utbränningskreditering för PWR samt BA-kreditering för BWR. Utbränningskreditering innebär att den minskning av reaktiviteten som sker då bränslet bestrålas i reaktorn och utbränningen ökar, tillgodoräknas i kriticitetsanalyserna. BA-kreditering innebär att hänsyn tas till att bränslet innehåller så kallad brännbar absorber (BA), främst gadolinium-155, som är en stark neutronabsorbator och därmed minskar bränslets reaktivitet.

SKB:s program avseende kriticitetssäkerhet utvecklar löpande använd metodik och validerar nya versioner av beräkningsprogram.

Nuläge

Om kapselns integritet skulle förloras och vatten tränger in kommer ett antal korrosionsprocesser att starta. Dessa kommer att påverka de interna materialen och deras geometrier. SKB arbetar för närvarande med att utveckla tidigare arbete (Agrenius och Spahiu 2016) om hur detta sker och vilken påverkan på reaktiviteten som det kommer att få. Det tidigare arbetet har nu kompletterats med en utredning om den långsiktiga stabiliteten hos olika fissionsprodukter och andra nuklider som tillgodoräknas i kriticitetsanalysen. Speciellt viktigt är att gadolinium har visats finnas kvar i urandioxid i miljontals år (Hidaka och Holliger 1998), samt att övriga grundämnen som molybden, teknetium, rutenium och rodium frigörs kongruent med urandioxiden då det använda bränslet lakas under förhållanden som liknar slutförvarsmiljön (Ekeröth et al. 2020).

De internationella standarder och riktlinjer som SKB har använt sig av i framtagandet av metodiken för kriticitetsanalys täcker inte fullt ut alla aspekter som måste beaktas i det mycket långsiktiga förloppet som gäller för Kärnbränsleförvaret. SKB deltar därför i ett internationellt samarbete om Post Closure Critical Safety (PCCS) som en del av samarbetet inom Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform (IGD-TP).

Kriticitetsanalysen för Kärnbränsleförvaret anger för PWR-bränslen en minsta utbränning som funktion av anrikning, som måste uppnås för att få placera bränslet i en kapsel. Alla bränsleelement kommer inte att ha uppnått denna utbränning, exempelvis avviker ettårigt bränsle från Ringhals 2 sluthärd från nu gällande krav. SKB:s metodik för kriticitetsanalys måste utvecklas för att dessa bränslen ska kunna omhändertas. Detta kan lämpligen göras genom att utföra kapselspecifika beräkningar. Det innebär att istället för att använda sig av en konservativt antagen utbränning och drifthistorik för alla ingående bränsleelement, baseras beräkningarna på den verkliga drifthistoriken tagen från kraftverkens härduppföljningar.

Om detaljerad bränsleinformation används för att göra kapselspecifika beräkningar av kriticitet ställs höga krav på att den bränsleinformation som används är korrekt. Arbetet med detta beskrivs i avsnitt 7.3. Det blir också av ytterligare vikt att kunna visa att rätt bränsleelement väljs och att varje element har den karakteristik som förväntas. Utvecklingsarbetet med verifiering av detta beskrivs i avsnitt 7.2.

Program

- Vidareutveckling av metodiken för kriticitetsanalys avseende de aspekter som är unika för Kärnbränsleförvaret. Arbetet innefattar bland annat:
 - Val av experiment för validering av beräkningskoder. I dagsläget finns få experiment tillgängliga i OECD/NEA:s databas som tillfredställande täcker in de specifika förhållandena i Kärnbränsleförvaret.
 - Internationellt samarbete för att till exempel utvärdera vilka scenarier som bör beaktas i kriticitetsanalysen för de verkligt långa tidsperioderna.
 - Effekter av eventuella geometri- och materialförändringar vid utveckling av kapselns insats.
- Slutföra arbetet med att ta fram metodik för kriticitetsanalys av bränsle som inte uppfyller dagens utbränningskriterier.
- Fortsatt metodutveckling för kapselspecifika kriticitetsberäkningar.

7.6 Kärnämneskontroll

Tillämpningen av kärnämneskontroll måste säkerställa kontinuerlig kännedom om kärnbränslet. Detta innebär kontroller och verifiering för att tillse att det använda kärnbränslet inte kommer på avvägar. Det medför att utvecklingen av kärnämneskontrollen för KBS-3-systemet i huvudsak rör följande områden:

- Metod för verifiering av deklarerat kärnämne.
- Logistik.
- Identifiering av kopparkapslar.
- Sigill.
- Hantering av onormala händelser.

Utvecklingsarbetet kommer att genomföras sammanhållet så att helheten inom kärnämneskontrollen beaktas, för att på så sätt säkerställa kontinuerlig kännedom om kärnämne i KBS-3-systemet.

Nuläge

SKB har bidragit till EU-kommissionens forskning och utveckling av metoder för märkning och identifiering av kopparkapslar. Bedömningen är att gravering av identitetsmärkning på kapselns lock är den mest tillförlitliga metoden och den som kan accepteras i produktionsmiljö. Den fortsatta utvecklingen kommer att inriktas mot teknik för säker avläsning av identitetsmärkningen. Märkning av kapseln med gravering utgör referensutformning.

Reversering av kapslar från slutförvarsanläggningen till Clink kommer att kunna göras med samma utrustning och system som används vid normal drift. Bokföringen av förflyttningarna ska kunna hanteras reversibelt i systemet för kärnämneskontroll.

SKB har lämnat underlag till EU-kommissionen, som sedan kommit med förslag till sigill för användning på KTB:n. Detaljerna kommer att utvecklas och preciseras i samband med utvecklingen av transportbehållaren.

Genom löpande avstämning i projekteringsarbetet avseende kärnämneskontroll, beaktas underlättande av kärnämneskontroll i anläggningarna. Exempel på områden som omfattas är transportsystemet, logistik och förflyttningssvågar för bränslet och kapseln.

Program

- Metodik för verifiering av kärnämne kommer att utarbetas, kopplat till utveckling av bränslemätning (avsnitt 7.2) och bränsleinformation (avsnitt 7.3).
- Utvecklingen av metodiken för att kombinera bränsledata med karakteriseringsmätningar för verifiering mot deklarerat kärnämne pågår och kommer att fortsätta. Inom detta område pågår också utveckling av mätstationens utformning, metodik och teknik för kärnämnesverifiering.
- Logistikstudie med avseende på kärnämneskontroll av färdiga kopparkapslar i Clink kommer att utarbetas i samband med anläggningskonstruktion och kommer att diskuteras i samarbetsforum med kontrollorganen.
- Utveckling av identifieringsmetod för kopparkapslar kommer att fokusera på säker avläsning av ingraverade identitetsmärkningar samt mer precist på hur märkningen ska göras och var i processen det är lämpligast att göra den.

7.7 Bränsleupplösning

Bränsleupplösning medför frigörelse av radionuklider och processen är central för den konsekvensanalys som ingår i analysen av säkerhet efter förslutning. Forskning inom detta område sker för att öka processförståelse för bränsleupplösning i främst reducerande miljöer, men också i syresatta miljöer. Bränslet består av urandioxidkutsar omslutna av kapsling samt konstruktionsmaterial.

Alla delar kan komma att frigöra radionuklider om vatten kommer i kontakt med bränslet. Detta sker med olika hastighet beroende på var i bränslet radionukliderna sitter. Vissa radionuklider sitter i gapet mellan kuts och kapsling samt i sprickor och korngränser i bränslekutsarna. Denna del av radionuklidinventariet kallas gapinventariet (eller pulsutsläppsandelen). Gapinventariet antas frigöras snabbt vid vattenkontakt. Majoriteten av alla radionuklider i bränslet frigörs i takt med upplösning av bränslematrisen, alltså den urandioxid som utgör själva bränslekutsen. Forskning om bränsleupplösning fokuserar på matrisupplösning och frigörelse av gapinventariet, men inkluderar också korrosion av kapsling och andra metallegeringar i bränslet.

Nuläge

Under den senaste Fud-perioden har ett antal forskningsuppdrag i Studsvik fortsatt och helt eller delvis avslutats. Uppdraget med långtidslakning i ampuller pågår, men ytterligare arbete med analys och tolkning av data krävs innan resultaten så här långt är redo för publicering.

Ett Studsvikuppdrag rör avslut och analys av det mångåriga bränslelakningsprojektet ”Serie 3”, vilket startade 1982. I detta projekt lakades bitar av bränsle i kolvar med luftkontakt och experimenten gav därmed värdefulla data gällande oxidativ bränsleupplösning och radionuklidfrigörelse i syresatt miljö. Resultaten från den sista provtagningen av ”Serie 3” är klara, men det återstår att sammanställa alla data från 1982 och framåt innan en sammanfattande artikel eller rapport är redo att publiceras. Däremot har vissa ytterligare studier på dessa bränsleprov genomförts med syftet att undersöka hur mycket av proven som omvandlats till sekundärfaser under de cirka 37 år som de två proven lakades. Dessa resultat ges av Roth et al. (2021) och visar att sekundärfaser bildats, framför allt på det prov som lakats i avjoniserat vatten, medan det prov som lakats i syntetiskt grundvatten (innehållande karbonat) hade minimalt med sekundärfaser, vilket var förväntat. De sekundärfaser som påträffades var främst studtit samt metaschoepit, och de innehöll, förutom uran, en viss mängd radionuklider såsom jod och cesium (Roth et al. 2021).

Data från bränslelakningsexperiment i syresatt miljö, vilket inte motsvarar förväntad förvarsmiljö, kan ge relevant information för bestämning av det så kallade gapinventariet samt förståelse för vad som kan påverka oxidativ bränsleupplösning och frigörelse av radionuklider. Under den gångna Fud-perioden har data från ett flertal sådana experiment sammanställts och analyserats (Roth et al. 2021), med slutsatsen att vald provpreparering kan påverka hur snabbt olika radionuklider frigörs från proven. Specifikt verkar det som om resultaten kan variera beroende på om det är ett segment av en bränslestav eller fragment av bränsle som lakas.

Ett experiment med kromdopat bränsle har också genomförts för att undersöka framför allt gapinventariet. Försöket genomfördes i syresatt miljö med bränslefragment, vilka visade sig ha mycket liten kornstorlek (Barreiro Fidalgo et al. 2021). Resultaten visar att även om gapinventariet ligger på liknande nivåer som vanligt, icke-dopat bränsle, verkar det som om fraktionen av jod, molybden och teknetium är lite högre än för standardbränsle. Detta kan dock vara ett resultat av den fina kornstorleken på provet. Ett annat försök, vilket syftade till att bestämma fraktion radionuklider i bränslets korngränser (Fidalgo et al. 2019), genomfördes via malning och samtidig lakning. Tanken var att mala till kornstorlek, så att korngränserna frilades. Det visade sig dock vara svårt och resultaten reflekterar sannolikt ökad frigörelsehastighet från pulveriserad bränslematris.

För bränsleupplösning under förvarsliknande förhållanden har experimentella resultat visat att vätgas motverkar oxidativ bränsleupplösning (Ekeroth et al. 2020). En viktig observation från försöket är att ytan av ett bränsleprov som lakats med vätgas närvarande består av urandioxid och alltså inte högre oxider. Tidigare erhållna data från lakning av ett amerikanskt högutbränt bränsle under vätgas har analyserats och publicerats (Puranen et al. 2022). Resultaten visar att vätgas effektivt kan motverka oxidativ bränsleupplösning även för bränslen med utbränning 70–75 MWd/kgU.

Studier som ingår i två nu avslutade doktorandprojekt på KTH (Maier 2019, El Jamal 2021) har rapporterats i öppen vetenskaplig litteratur. En licentiatavhandling från Chalmers (Hansson 2020) med tillhörande artiklar har också publicerats. Doktorandprojekten syftar till att öka kunskapen om de processer och mekanismer som reglerar oxidativ bränsleupplösning, såsom katalytisk sönderdelning av väteperoxid och vätgaseffekten. Under perioden har också nya, SKB-finansierade doktorandprojekt startat på KTH (ett helfinansierat och ett delfinansierat) och Chalmers (helfinansierat). För detaljer om forskningen som genomförts av doktoranderna hänvisas till publicerade vetenskapliga artiklar

(Maier et al. 2020a, b, Li et al. 2019, 2021, Hansson et al. 2020, 2021, El Jamal et al. 2021a, b, c, d). Sammanfattningsvis har resultaten ökat den grundläggande förståelsen för hur de redoxreaktioner som sker på ytan av urandioxid påverkar upplösningen av uran i olika miljöer. Denna förståelse möjliggör vidare arbete med framtagning av en modell för bränsleupplösning i förvarsmiljön.

Inom ramen för det nu avslutade EU-projektet DisCo, studerades matrisupplösning av använt bränsle och olika varianter av bränsledioxid. Syftet med projektet var huvudsakligen att undersöka om dopat bränsle, det vill säga bränsle med tillsatser av till exempel krom eller aluminium och Mox-bränsle löser upp sig på liknande vis och med liknande hastighet som standardbränsle. Experimenten som ingick genomfördes främst i reducerande miljö, men även andra typer av experiment genomfördes för att öka kunskapen om oxidativ bränsleupplösning och hur olika tillsatser påverkar urandioxid. Projektresultat har rapporterats löpande via rapporter (<https://cordis.europa.eu/project/id/755443/results>), men också via vetenskapliga artiklar (Evins et al. 2020, Fidalgo et al. 2020, Riba et al. 2020, Cordara et al. 2020, Curti och Kulik 2020, Miléna-Perez et al. 2021, Cachoir et al. 2021, Kegler et al. 2021). En viktig slutsats från projektet är att den långsamma upplösningen av bränslematrisen hos de moderna bränslen som studerades (Adopt och Mox) inte signifikant skiljer sig från standardbränsle. Detta stöds av både bränsleförsök och experiment med analog material. Data från olika experiment i projektet har också använts för utveckling av modeller av bränsleupplösning, med lyckat resultat. Det finns dock vissa återstående frågor angående effekter av förvarsmiljön (till exempel närvaro av vätgas och järn). Några bränsleexperiment blev försenade på grund av covid-19-pandemin, vilket medför att vissa resultat förväntas finnas tillgängliga först under Fud-perioden.

Under den gångna Fud-perioden har också insatser gjorts för att utreda hur miljön i en bränslefyllt och försluten kopparkapsel kan påverka bränslekapslingens egenskaper. Detta har undersökts närmare framför allt för att uppskatta om hydrider kan förväntas orsaka sprickor i bränslekapslingen, så att bränslematrisen riskerar att komma i kontakt med de gaser och vätskor som finns i en försluten kapsel. Uppskattningsvis är det maximalt cirka tre procent av bränslet som kan ha trasig bränslekapsling efter den första varma perioden i kopparkapseln (Evins 2020).

Program

- Pågående doktorandprojekt på Chalmers om hur vätgas och alfa-strålning vid en urandioxidyta påverkar radiolys och oxidation av uran avslutas i slutet 2022. Ett nytt doktorandprojekt har startats, med annat fokus, se avsnitt 7.8.
- Pågående doktorandprojekt på KTH om effekter av vattenradiolys på upplösning av urandioxid avslutas 2023. Ett nytt doktorandprojekt om mekanismer och kinetik för kemiska processer relevanta för strålningsinducerad upplösning av använt kärnbränsle startade hösten 2021 och kommer att pågå till 2025.
- Utveckling av en beräkningsmodell för bränsleupplösning sker i samarbete med KTH och parallellt med doktorandarbetet. Detta uppdrag förväntas pågå till 2025.
- Ett pågående uppdrag med Studsvik som syftar till att undersöka hur bränsle i slutna glasampuller löser upp sig, kommer att fortsätta till 2026. De sista ampullerna kommer att lagras, i väntan på öppning år 2026.
- Avslut av pågående uppdrag och uppstart av nya uppdrag gällande dopade bränslen kommer genomföras med Studsvik. Lakning av kromdopat bränsle i autoklav ska startas och data från genomförda experiment med två olika kromdopade bränslen ska sammanställas och publiceras i vetenskapliga artiklar.
- Ytterligare studier som rör pulsutsläppsandelen ska startas. Fokus för detta är korngränsinventariet vilket, i en första fas, planeras att undersökas med Studsviks laserablationsinstrument.
- Tillsammans med Studsvik arbeta med datasammanställning rörande det nu avslutade experimentet ”Serie 3”. Denna datainsamling kommer att ske i dokumentations- och modellerings syfte.
- Lakningsförsök med bränsle i närvaro av sulfid planeras för att undersöka om sulfid kan påverka redoxreaktionerna vid bränslets yta.

7.8 Radionuklidspeciering och lösligheter

Detta avsnitt beskriver de forskningsaktiviteter som genomförs för att öka förståelsen av de processer som påverkar radionuklidkemin i en trasig kopparkapsel. När radionuklider frigörs från bränslet ökar koncentrationen av dessa i vattnet och den förväntade koncentrationen beror av grundämnets löslighet och speciering. Koncentrationen i lösning begränsas av den fasta fas som har lägst löslighet. Kunskapen inom detta område baseras på termodynamik och användandet av termodynamiska data, vilka samlas i databaser för att användas i modelleringsverktyg.

Nuläge

Urankemi är en central fråga för Kärnbränsleförvaret. I den reducerande slutförvarsmiljön förväntas två mineral vara stabila: uraninit (urandioxid) och koffinit (uransilikat). Under den senaste Fud-perioden avslutades ett internationellt projekt angående koffinitbildning och resultat från projektet finns tillgängliga i öppen vetenskaplig litteratur (Szenknect et al. 2020). Data från syrefria, rumstempererade experiment med urandioxid och silikat i vattenlösning visar att koffinit kan bildas på ytan av en urandioxidkuts i ett system som hålls vid rumstemperatur och en negativ redoxpotential (Eh cirka -50 mV, Szenknect et al. 2020). Vid denna redoxpotential är oxiderade uranspecies i vattenlösning stabila, och koffinitbildning i experimentet har antagligen skett via oxidation följt av reduktion. Eftersom den förväntade redoxpotentialen i slutförvarsmiljön är lägre än vad som uppnåtts i experimenten, behöver implikationerna för slutförvaret utredas med vidare analyser.

Ett experiment för att undersöka effekter av möjliga kalcium-uranyl-karbonatkomplex i ett grundvatten av Forsmarktyp, har nyligen genomförts inom ramen för ett doktorandprojekt vid Chalmers. Frågan gäller om bildning av detta komplex kan hindra reduktion av uran i ett reducerande system. När resultaten finns sammanställda, kommer de att publiceras i öppen vetenskaplig litteratur.

EU-projektet DisCo har också involverat frågor om speciering och lösligheter. Inom modelleringsdelen av DisCo har termodynamiska data använts för att modellera de experimentella systemen. Resultat från Riba et al. (2021) visar att modellen, som inkluderar termodynamiska beräkningar, kan simulera uppmätta radionuklidkoncentrationer samt ge indikationer på vilket redoxpar som styr redoxpotentialen i systemet. Ett annat modelleringsarbete inom DisCo involverade obestrålat Mox-bränsle i ett lerbaserat slutförvar och resultaten visade dels att koncentrationerna av uran och plutonium kontrollerades av deras fyrvärda, amorfa faser, dels att järn reagerade med oxidanterna och föll ut som mineralen magnetit och chukanovit (De Windt et al. 2021).

För att kunna genomföra löslighetsberäkningar för Kärnbränsleförvaret och använda de kemiska modeller där dessa beräkningar ingår, krävs kvalitetssäkrade termodynamiska data för de relevanta grundämnena. Därför har SKB under många år deltagit i NEA-TDB-projektet. Vikten av detta projekt för slutförvarsprogram runt om i världen belyses av Ragoussi och Costa (2019). I den nuvarande fasen, NEA-TDB-6, har en elektronisk databas blivit tillgänglig (Martinez et al. 2019) och två volymer med granskade termodynamiska data har publicerats: en uppdatering för aktinider (Grenthe et al. 2020) och en om järn (Lemire et al. 2020).

Program

- Ett doktorandprojekt på Chalmers med fokus på aktinidkemi och möjliga samfällningar i förvarsmiljön startades under hösten 2021 och förväntas pågå till 2026.
- Delar av ett pågående doktorandprojekt på Chalmers, vilket förväntas avslutas 2022, undersöker hur komplex med UO_2^{2+} , Ca och CO_3^{2-} kan påverka reduktionen av UO_2^{2+} i den förväntade slutförvarsmiljön.
- SKB kommer även fortsatt att delta i det pågående NEA-TDB-projektet och ett antal nya publikationer förväntas under de kommande åren.
- En sammanfattande genomgång av den kunskap om koffinitisering som togs fram inom det avslutade koffinitprojektet kommer att genomföras.
- Inom Eurad sker forskningsaktiviteter som berör lösligheter, speciering och fällning specifikt inom arbetspaketet Fundamental understanding of radionuclide retention (Future). SKB deltar inte aktivt i arbetspaketet, men via Eurad kommer relevanta frågor, till exempel Ra-Ba-samfällning, att bevakas.

8 Kapsel för använt kärnbränsle

I Kärnbränsleförvaret kommer det använda kärnbränslet att förvaras i kapslar bestående av ett cylindriskt kopparhölje med en lastbärande insats. Kapseln är 4,84 m lång och har en diameter på 1,05 m, och kopparhöljet är 5 cm tjockt. Kopparhöljet skyddar mot korrosion i förvaringsmiljön och insatsen ger skydd mot de mekaniska laster som kan uppkomma i förvaret. Kapseln med dess insats utgör den viktigaste barriären i KBS-3-systemet genom att den ska innesluta det använda kärnbränslet under tillräckligt lång tid för att radionukliderna ska hinna sönderfalla så mycket att de inte längre utgör någon risk för människor eller miljön.

I detta kapitel beskrivs nuläge och den kompletterande forskning som planeras när det gäller egenskaper hos kapseln inför kommande säkerhetsredovisningar för Kärnbränsleförvaret. Vidare beskrivs den teknikutveckling som planeras för att kapseln ska kunna tillverkas, kontrolleras, verifieras mot ställda krav och användas inom KBS-3-systemet.

8.1 Korrosion

I Kärnbränsleförvaret finns endast ett fåtal situationer som kan ge upphov till korrosion av kapseln. En viss initial korrosion är att förvänta från den mängd syre som finns instängd i bentonitens porer tillsammans med oxidativa specier som bildas till följd av kärnbränslets joniserande strålning under förvarets första hundra år. Sulfidkorrosion, som förväntas vara den långsiktigt viktigaste korrosionsprocessen, begränsas av låg tillförsel av sulfid samt karakteriseras mekanistiskt av främst allmänkorrosion istället för lokal korrosion (gropfrätning). Sulfidkorrosion kommer därför fortsatt att studeras, tillsammans med olika mekanismer för spänningskorrosion. För att analysera kopparmaterialets beständighet som barriär kommer även modelleringen för att karakterisera korrosionsförlopp över tid och rum fortsatt att behöva utvecklas.

I sitt yttrande till regeringen om tillåtlighet enligt MB för ett slutförvar i Forsmark, efterfrågade MMD ytterligare underlag om ett antal forskningsfrågor beträffande kapselns integritet. För att tillgodose MMD:s önskemål presenterade SKB 2019 en rapport (SKB TR-19-15) som ingående beskriver resultat från den forskning som utförts inom efterfrågade områden efter att SR-Site (SKB TR-11-01) publicerades. Denna rapport kommer fortsättningsvis att hänvisas till som Kapselkompletteringen.

Samtliga aktiviteter som redovisas under Program i detta avsnitt syftar till att stärka underlaget till kommande analys av säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret och till att minska konservatismen i ett antal försiktiga antaganden som görs i analysen.

8.1.1 Sulfidkorrosion

Sulfid är den långsiktigt viktigaste korrodanten för koppar i slutförvaringsmiljö. I säkerhetsanalysen SR-Site gav kapselbrott till följd av sulfidkorrosion, för fall då bufferten eroderats bort det, dominerande riskbidraget. Det vetenskapliga underlaget avseende sulfidkorrosion i slutförvaringsmiljö är omfattande, vilket framgår av bland annat Kapselkompletteringen. För att kunna minska konservatismen i ett antal försiktiga antaganden i kommande säkerhetsanalyser behövs en bättre förståelse för de detaljerade mekanismerna i korrosionsprocessen.

Nuläge

Bildningen av kopparsulfidfilm på koppar i sulfidlösning och mekanismerna för detta, har fortsatt studerats med elektrokemiska metoder, olika typer av mikroskopi liksom i korrosionsförsök. Tidigare har fokus i forskningen varit frågan om vad som begränsar filmtillväxten, vilket har visats vara sulfidflöden till kopparytan. Nu har fokus mer övergått till frågor om passivitet och egenskaper hos sulfidfilmen samt förutsättningar för lokal korrosion. En passiv film kan vara en förutsättning för lokal korrosion, medan en korrosionsfilm utan passiverande egenskaper ger upphov till jämnare allmänkorrosion begränsad av tillförseln av korrodanter. SKB:s arbete utförs huvudsakligen vid University of Western Ontario (UWO) i Kanada.

Studierna med elektrokemiska metoder av mekanismer för filmtillväxt har utökats med experiment med andra grundvattenjoner närvarande (Martino et al. 2020). SKB bevakar även de studier som genomförs inom ramen för det kanadensiska programmet för att studera sulfidkorrosion under förhållanden av relevans för det kanadensiska förvaret, till exempel vid hög kloridjonkoncentration (Senior et al. 2021).

För att bättre förstå om någon form av lokal korrosion kan uppkomma vid korrosion av koppar i sulfidlösning, har SKB låtit genomföra studier under varierade försöksbetingelser. Dessa har sammanfattats i Kapselkompletteringen, där även utförliga resultat och tillhörande analyser återfinns. Bland annat redovisas undersökningar av bakteriell bildning av en biofilm, vilken kan verka likt en passiv film och orsaka lokal korrosion. Den generella slutsatsen var att i alla försök där man sett biofilm och/eller lokal korrosion från bakteriell aktivitet var koncentrationen av sulfid i lösningen högre än de högsta koncentrationer som uppmätts i grundvattnet i Forsmark. Även sulfidflödet i försöken var högre än vad som förväntas i slutförvaret (eftersom experimenten gjordes utan bentonit som begränsar transporten av sulfid till kopparytan), varför sådana observationer inte direkt kan appliceras för kapseln i slutförvaret. För att möjliggöra karakterisering genom mikroskopi av kopparytan under bildad sulfidfilm krävs en metod för att avlägsna filmen med så liten påverkan på den underliggande kopparytan som möjligt. Från de inledande studierna av hur sulfidfilmen kan tas bort (Chen et al. 2019) har en förbättrad metod utvecklats, vilken avses att redovisas som publikation i vetenskaplig tidskrift.

Huruvida den bildade filmen är passiv har studerats och diskuterats tidigare, till exempel i Kapselkompletteringen. Studier som SKB har genomfört därefter av de olika skikt, som uppstår vid filmbildning under olika förhållanden indikerar att en passiv film inte kan uppstå vid de potentialer och sulfidkoncentrationer (och därmed inte heller de sulfidflöden) som kan förväntas under förvarsförhållanden (Guo et al. 2019, 2020, 2021). Detta styrker tidigare beskrivna transportbegränsade mekanismer för sulfidkorrosion.

Kvantkemiska beräkningar har utförts för att öka förståelsen för den elektrokemiska gränssytan mellan koppar, kopparsulfid och grundvatten (Halldin Stenlid et al. 2020a, b) samt för reaktionsmekanismen vid sulfidkorrosion av koppar (Halldin Stenlid et al. 2019). Vidare har en studie genomförts för att karakterisera skillnader i tillväxtmekanism och morfologi för sulfid- och oxidfilmer i korrosionsprocessens tidiga skede (Halldin Stenlid et al. 2021).

En sammanfattning av kunskapsläget för sulfidkorrosion, under både mättade och omättade förhållanden i bentoniten, återfinns i Kapselkompletteringen. Den viktigaste slutsatsen är att så länge bentoniten är intakt, och oavsett dess vattenmättnadsgrad, är de sulfidflöden som kan uppkomma genom lersystemet med god marginal lägre än de sulfidflöden i experiment där lokala korrosionsfenomen, som mikrogalvanisk korrosion och ytlig sprickbildning under pålagd dragspänning, observerats (avsnitt 8.1.5).

Program

- Laboratorieexperiment kommer fortsatt att utföras vid UWO, i första hand elektrokemiska försök för att studera sulfidering av oxiderad koppar, och korrosionsexponeringar för att på ett systematiskt sätt undersöka förekomsten av lokal korrosion, däribland mikrogalvanisk korrosion.
- SKB ingår i ett konsortium (tillsammans med NWMO, Nagra och ONDRAF/NIRAS) som bedriver forskning vid CanmetMATERIALS, Kanada. Kopparstudierna omfattar exponeringar i olika sulfidmiljöer där korrosion mäts som vätgasutveckling. Inom konsortiet har SKB även initierat studier av väteinträngning från sulfidkorrosion.
- Den långsiktiga utveckling av koppar som utsätts för en miljö som ändras med tiden, studeras i Michigan International Copper Analogue project (MICA), där den pågående fas I omfattar en inventering av tillgängliga kopparprover från naturliga analogier och analysmetoder. Analyserna planeras sedan till en fas II. Inom ramen för studier av naturliga analogier följer SKB även de arbeten som utförs av det kanadensiska slutförvarsprogrammet, där kunskapsläget sammanställts i King (2021a).

- SKB planerar att se över behovet att även studera hög kloridjonhalt i kombination med sulfid i lösningen, effekter av gasformig sulfid, till exempel under omättade förhållanden, liksom effekter av biofilm på kapselytan.

8.1.2 Korrosion under oxiderande förhållanden

Korrosion under oxiderande förhållanden innefattar framför allt den allmänkorrosion som kapseln utsätts för innan förslutning samt i förvaret tills kvarvarande syre förbrukats, vilket förväntas ske inom tiotals år efter förslutning. Lokal korrosion (även kallad gropfrätning) under oxiderande förhållanden behandlades i SR-Site som ojämn allmänkorrosion (eng surface roughening) med ett maximalt extra korrosionsdjup, i stället för de tidigare använda gropfrätningfaktorererna.

Nuläge

De porvattensammansättningar som är aktuella i förvaret gynnar allmänkorrosion och ger i allmänhet inte upphov till någon passivfilm (King och Lilja 2013). En sådan film är en förutsättning för att lokal korrosion under oxiderande förhållanden ska uppstå. För att i ännu större utsträckning täcka in den osäkerhet och variabilitet i data som finns, har SKB påbörjat utvecklingen av probabilistiska modeller för lokal korrosion. Modellering finns än så länge gjord för det enklare fallet med oxiderande förhållanden i mättad bentonit (Briggs et al. 2020, 2021), även om dessa förhållanden troligen inte kommer att uppstå i förvaret då tiden för återmättnad i de flesta deponeringshål förväntas vara längre än den inledande oxiderande perioden. Modellen visar på vikten av tillgängligt syre för passiviteten, men även för groptillväxt, vilken avstannar när syret har tagit slut. Ett nytt underlag är tillgången till den databas som NWMO i Kanada låtit UWO ta fram (summerat i Qin et al. 2017) och som innehåller ett stort antal potentialmätningar under olika förhållanden (temperatur, pH, koncentrationer av klorid, sulfat och karbonat). För fortsatt planerade modelleringsstudier, se avsnitt 8.1.6.

Data från tidigare fältförsök med koppar i förvarsliknande miljöer har sammanställts och analyserats med avseende på allmän korrosion (massförlust) och på vilka miljöparametrar som samvarierar med korrosionsdjupet (Johansson et al. 2019, Johansson 2019). Analys av data från försöken MiniCan, LOT, ABM och Febex visar att korrosionsdjupet korrelerar med den uppskattade totala mängden initial syrgas i bentonit och luftfyllda spalter i närområdet.

Brytning och analys av kopparkomponenter från försökspaketen LOT S2 och LOT A3 har visat på korrosion av en art och omfattning i linje med tidigare fältförsök (Johansson et al. 2020). De observerade korrosionsprodukterna är i första hand oxider, men små mängder svavel detekterades på ytan, vilket i vissa fall kan tänkas komma från bildning av kopparsulfid. De analyserade kopparytorna uppvisar en grov topografi med gropar och defekter. Det är oklart hur stor del av denna topografi som härrör från tillverkning och hur mycket som kan ha orsakats av korrosion. Även om groparna till fullo antas ha orsakats av korrosion, ligger de inom de djup som förväntas från tidigare fältförsök och modellering av lokal korrosion under oxiderande förhållanden.

Analys av allmänkorrosion på koppar inom ramen för Lasgit-försöket (Cuss et al. 2010; se även avsnitt 10.3.1) ger resultat som överensstämmer med tidigare fältstudier. Inga tecken på gropkorrosion observerades. På de analyserade kopparytorna återfanns endast enstaka punkter med begränsad korrosion och som kan tänkas härröra från sulfidkorrosion. (Wendel et al. 2022).

Experiment utförda vid UWO i Kanada med syfte att mäta potentialer på koppar i bentonit (det vill säga i kontakt med bentonitporvatten) har avrapporterats i en doktorsavhandling (Martino 2018) samt i Martino et al. (2021).

Program

- Pågående laboratoriestudier av syreförbrukningshastighet och kopparkorrosion i omättad bentonit kommer att redovisas under Fud-perioden. (För experiment med syreförbrukning i bentonit utan närvaro av koppar, se även avsnitt 10.1.1.)

- Som ett komplement till genomförda fältförsök har SKB initierat laboratorieförsök för studier av koppar–bentonitinteraktioner i syrgasfri miljö, för att undersöka hur adsorption av koppar påverkar bentonitens egenskaper (avsnitt 10.3.5).
- SKB planerar för brytning av den inre sektionen inom Prototypförvaret i Äspölaboratoriet. Analys och rapportering av kapselkomponenter från prototypförsöken inkluderas i planen för brytning.
- Brytning och analys planeras för kopparkomponenter från återstående försökspaket inom försöksserierna LOT, ABM och MiniCan (avsnitt 4.10.1 och 10.3.5).

8.1.3 Koppar i rent vatten

Frågan om kopparkorrosion i rent, syrgasfritt vatten har rönt stor uppmärksamhet under ett flertal år sedan en grupp forskare vid KTH framfört uppfattningen att omfattningen av denna korrosionsform är betydligt större än vad etablerad vetenskap förutsäger.

Nuläge

Som rapporterats i tidigare Fud-program har SKB studerat processen ingående, utan att finna något stöd för KTH-forskarnas uppfattning. SSM anger i oktober 2021 (SSM 2021b) ”att det inte finns några belägg för betydelsen av denna korrosionsform och inte heller någon rimlig förklaring till varför traditionell termodynamik inte är tillämplig”. Kärnavfallsrådet konstaterar i sin kunskapslägesrapport i februari 2022 (Kärnavfallsrådet 2022): ”Hultquist och medarbetare har inte visat att den vätgas som bildats i deras experiment korrelerar med den massa de bildade kopparkorrosionsprodukterna borde ha.”

SKB:s arbete med att utveckla en kinetisk modell för koppars reaktivitet i anoxisk vattenlösning har slutförts med data från experiment i perkloratlösning. Modellen har sedan använts för att extrapolera till en vattenlösning utan tillsatta joner, med slutsatsen att den uppmätta vätgasen kommer från en ytreaktion som begränsas av antalet tillgängliga adsorptionsplatser på kopparytan (Betova et al. 2021). Även Senior et al. (2021) drar slutsatsen att de mycket små uppmätta vätgasmängderna vid experiment med koppar i vatten, kommer från reaktion med en mycket begränsad mängd mer reaktiva ytatomer.

Efter den inledande studien för att utvärdera möjligheten att formulera en ”mixed-potential model” (King och Orazem 2017) drivs inte arbetet vidare på grund av den knappa tillgången på kinetiska data.

Program

- Det är SKB:s slutsats att det inte finns något vetenskapligt stöd för att hävda att koppar korroderar i rent, syrgasfritt vatten på något annat sätt än vad etablerad vetenskap säger, och frågan hanteras i säkerhetsanalysen för Kärnbränsleförvaret. SKB planerar därför inga ytterligare studier inom området.

8.1.4 Strålningsinducerad korrosion

Strålningsinducerad korrosion av kopparkapseln sker till följd av de oxiderande radiolysprodukter som bildas när vatten på kapselns utsida absorberar gammastrålning från bränslet i kapseln. Det är framför allt under de första hundratals åren i Kärnbränsleförvaret som dosraten vid kapselytan kommer att generera radiolys av vatten i någon signifikant omfattning. I säkerhetsanalysen SR-Site uppskattades på teoretisk väg att denna korrosionsprocess skulle kunna ge ett genomsnittligt korrosionsdjup på maximalt 14 μm , vilket är försumbart såväl i relation till kopparkapselns tjocklek som jämfört med omfattningen av andra korrosionsprocesser.

Nuläge

Efter SR-Site studerades fortsatt inverkan av gammastrålning på korrosion av koppar i ett doktorandarbete på KTH samt vid det kanadensiska programmet, beskrivet i Kapselkompletteringen. NWMO har sammanställt kunskapsläget för effekterna av gammastrålning på kopparkorrosion och drar slutsatsen att effekten är minimal (ett par tiondels μm) och därför inte en avgörande faktor för kapselns livslängd (King och Behazin 2021).

Nya experiment och analyser som SKB låtit genomföra vid KTH visar att den relativa betydelsen av olika oxidanter som bildas under radiolys av vatten vid ytan skiljer sig drastiskt mellan till exempel urandioxid och kopparmetall, och att olika modeller därför måste användas för att beskriva de ytkemiska reaktionerna för de båda materialen. Den reviderade modellen för radiolytisk kopparkorrosion förutsäger idag den experimentellt observerade korrosionen av koppar under gammabestrålning med relativt god precision (Soroka et al. 2021). Modellen har även visat att relevanta grundvattenjoner vid förvaringsliknande koncentrationer endast har en mindre effekt på strålningsinducerad korrosion vid neutralt och basiskt pH (Jonsson 2021b).

Program

- Den modell som utvecklats för att beskriva radiolytisk korrosion av koppar och inverkan av ett flertal grundvattenkomponenter är under sammanställning och avses publiceras i en vetenskaplig tidskrift, se vidare avsnitt 8.1.6.
- SKB överväger förutsättningarna att gå vidare med de studier av bestrålningens påverkan på materialets mikrostruktur som gjorts i vakuum (Padovani et al. 2019) och då även på Cu-OFPC (oxygen-free, phosphorus doped copper). Genom att utföra bestrålningen i lösning kommer samtidig inverkan av bestrålning och korrosion på materialet att kunna studeras.

8.1.5 Spänningskorrosion

För att spänningskorrosion ska uppstå krävs samtidigt ett känsligt material, dragspänningar och specifika joner. Spänningskorrosion har hanterats i tidigare säkerhetsanalyser och har då i första hand avsett korrosion under oxiderande förhållanden i närvaro av nitrit, ammonium eller acetat (SKB TR-11-01). Eftersom de nödvändiga jonerna saknas i tillräckliga halter under den inledande oxiderande perioden i förvaret, har spänningskorrosion inte bedömts påverka kapselns integritet.

Frågan om spänningskorrosion kan ske också i närvaro av sulfid har diskuterats, framför allt sedan en japansk forskargrupp (Taniguchi och Kawasaki 2008) presenterade resultat som tolkades som en sådan process.

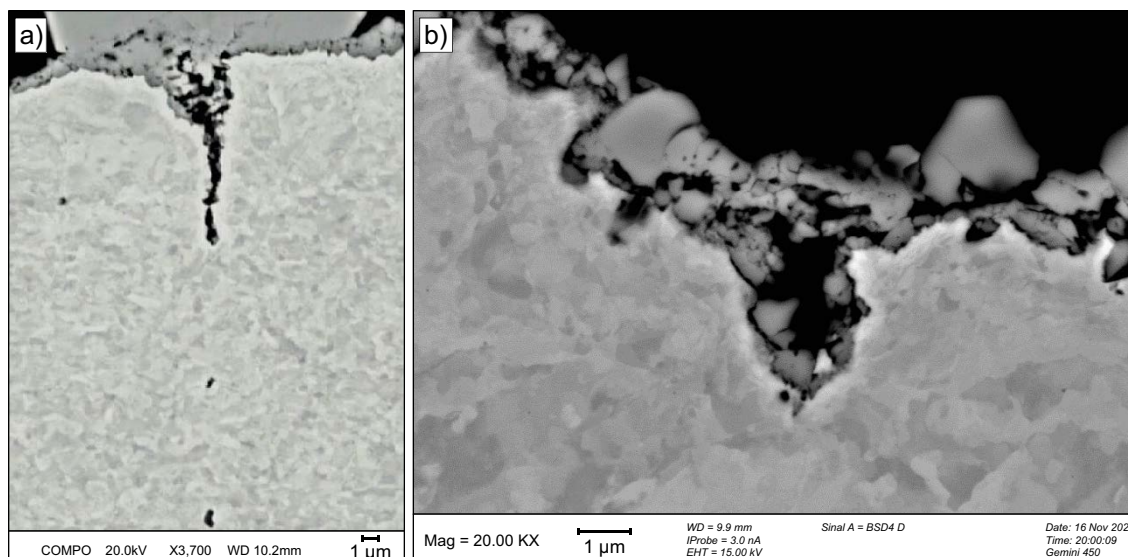
Nuläge

Sedan studien av Taniguchi och Kawasaki (2008) har ytterligare fyra olika grupper gjort experiment för att undersöka om spänningskorrosion kan uppträda i sulfidmiljö, vilket beskrivs i SKB:s summering av kunskapsläget i Kapselkompletteringen. Från de studier som gjorts, drar SKB slutsatsen att spänningskorrosion i sulfid inte hotar kapslarnas integritet i ett KBS-3-förvar i Forsmark, och detta även om den mekanistiska förståelsen för processen inte är helt klarlagd.

Flera försök har gjorts för att genom utmattnings (upprepad mekanisk belastning) återskapa de förspräckta prover som installerats i fältförsöken MiniCan 4 och 5 (Gordon et al. 2017, Johansson et al. 2017). Syftet var att kunna karakterisera dessa provers initialtillstånd bättre än vad som gjordes inför fältförsöken. Preliminära resultat har visat på svårigheter att åstadkomma dessa sprickor utan att få en stor plastisk deformation. Även de böjda spänningskorrosionsprover som ingick i MiniCan har nyttillverkats i syfte att undersöka mikrostrukturen efter tillverkning i de mest utsatta delarna.

SKB har fortsatt studierna med långsam dragprovning av kopparprovstavar i sulfidlösning vid Research Institutes of Sweden (RISE) med en utvidgad försöksmatrix, i syfte att pröva hypotesen om interkristallin korrosion förstärks av töjning. Lägre töjningshastighet och lägre temperaturer har använts, liksom variationer av den buffrande miljön (lägre jonstyrka samt boratbuffert istället för fosfatbuffert). Preliminära resultat visar att alla dessa ändringar ger färre och/eller rundare gropar, vilket indikerar att mekanismer som ger upphov till sprickbildning inte är verksamma. Som tidigare är groparna lokaliserade till korngränser. Figur 8-1 a visar exempel på en mer sprickliknande grop, medan figur 8-1 b visar att byte till lägre jonstyrka indikerar bildandet av en rundare grop. Uppdatering av den mekanistiska beskrivningen pågår, men sammantaget styrker de nya resultaten att spänningskorrosion i sulfid inte sker i förvaringsmiljö.

SSM har på liknande sätt som tidigare, låtit göra provning vid lägre töjningshastighet (Becker et al. 2020, Forsström et al. 2021) och noterat korrosion i korngränser snarare än förekomsten av sprickor.



Figur 8-1. Tvärsnitt tagna med svepelektronmikroskop från provstav utsatt för långsam dragprovning i en lösning med 10^{-3} mol/L sulfid vid $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, a) 10^{-2} mol/L fosfatbuffert och 10^{-2} mol/L klorid (Taxén et al. 2019), b) 10^{-3} mol/L fosfatbuffert och 10^{-3} mol/L klorid. De rundare groparna till höger indikerar att det inte är en sprickmekanism som är verksam. Notera att skalan för de två bilderna är olika.

Vid den högre sulfidkoncentrationen (10^{-3} mol/L) hade korngränser öppnats och var ofta fyllda med korrosionsprodukter. Vid lägre sulfidkoncentration (10^{-5} mol/L) iaktogs inte någon öppning av korngränserna, dock förekom viss korrosion i korngränser och längs ”slip-lines”. Sulfidexponering av obelastade prover uppvisade inte några sådana ytdefekter.

För att studera den så kallade Aaltonenmekanismen, har koppar kryppprovats under anodisk och katodisk polarisation i syrgasfri sulfidlösning (Ikäläinen et al. 2022). Resultaten visar att kryphastigheten kortvarigt påverkas av såväl polarisation som av sulfidexponering. Dessa förändringar var dock tydligt övergående och vidare studier skulle behövas för att ge en fördjupad mekanistisk förståelse. Från studien kan inte några tecken på spänningskorrosion påvisas i sulfidlösning med koncentrationen 25 mg/L ($7,8 \times 10^{-4}$ mol/L).

Ytterligare ett sätt att studera spänningskorrosion i sulfidlösning undersöks av VTT inom det finska programmet KYT2022 (nationellt finansierad forskning om kärnavfall) och innebär att hastigheten för återpassivering mäts och jämförs med motsvarande i nitritlösning (Huutilainen et al. 2020). Ett inledande försök har gjorts och resultaten, som av författarna anges som preliminära, visar att i sulfidlösning med koncentrationen 100 mg/L (3×10^{-3} mol/L) är hastigheten för återpassivering en storleksordning lägre än i nitritlösningar för vilka det är väl känt att spänningskorrosion inträffar. Den lägre hastigheten för återpassivering betyder att upplösning i sprickspetsen pågår under en längre tid och sprickan blir mindre spetsig, och därmed minskas spänningskoncentrationen som skulle kunna ge spricktillväxt.

Posiva har utvärderat spänningskorrosion med felträdsanalys, för både oxiderande och sulfid-innehållande miljöer, och kommer till slutsatsen att risken för att kapslar går sönder på grund av spänningskorrosion är liten (King 2021b). Som framgår av både denna och tidigare bedömningar i säkerhetsanalyser (exempelvis SKB TR-11-01, TR-19-15) grundar sig slutsatserna på en rad faktorer, som har olika vikt i olika miljöer. Posiva har tagit fram ytterligare ett experimentellt underlag genom långsam dragprovning av koppar i acetatlösning under oxiderande förhållanden, men även vid så höga acetathalter som $0,4\text{ mol/L}$ påvisas inte någon spänningskorrosion (Ikäläinen et al. 2021). För sulfidmiljö konstaterar SKB i Kapselkompletteringen att det inte är tillräckligt att jämföra sulfidkoncentrationen i experiment (som de ovan beskrivna) med de uppmätta sulfidhalterna i grundvattnet i Forsmark (en fördelning där max är $1,2 \times 10^{-4}$ mol/L, men de flesta värden är $< 10^{-5}$ mol/L sulfid). Istället är det sulfidflödet närmast kapselytan som är avgörande och det bestäms i sin tur av närvaron av bentonit.

Program

- Fortsatt göra experiment för att bättre förstå mekanismerna som ger de spänningskorrosionsliknande angreppen på koppar i sulfidlösning och ytterligare experiment vid RISE förutses.
- Inverkan av injektion av vakanser i kopparn under sulfidkorrosionen kommer att fortsatt undersökas, företrädevis vid VTT (Teknologiska forskningscentralen i Finland). Studier av denna typ kan också ge information om vätes roll för eventuell spänningskorrosion i sulfidlösning.
- Kvantkemiska modeller av gränssytan koppar–kopparsulfid kan komma att användas för att studera vakansdynamik samt möjlig inverkan av defekter på sprickinitiering.
- SKB ser över möjligheterna att göra ytterligare försök att tillverka och undersöka mikrostrukturen i för-spräckta prov av den typ som användes i MiniCan i syfte att studera sprickinitiering och sprickpropagering i koppar. Det har dock visat sig svårt att inducera sprickinitiering och -propagering i koppar, vilket visats till exempel i studier inom krypforskningen (Wu et al. 2013).

8.1.6 Utveckling av korrosionsmodeller och integrering av korrosionsanalyser

Modeller för korrosionsprocesser används på olika nivåer och med olika grad av kvantifiering (även en konceptuell beskrivning av en process kan sägas vara en modell) i analysen av säkerhet efter förslutning. När modellering nämns, avses dock oftast de modeller som beräknar den korrosion som sker under olika förhållanden. Beräkningarna kan göras som (matematiskt) enkla massbalanser eller till exempel endimensionella transportberäkningar. Alternativt kan beräkningarna utföras med programvara, som med numeriska beräkningar kopplar ihop korrosionsprocesser, omgivande kemisk miljö (till exempel hydrogeologiska data) och processer däri (till exempel radiolytiska processer och ämnestransport).

I beskrivningen av forskning för sakfrågorna (avsnitt 8.1.1–8.1.5) tas beräkningsmodeller ofta fram för att beskriva och analysera mekanismerna mer i detalj. Dessa modeller lämpar sig också för känslighetsanalyser, där inverkan av olika parametrar, osäkerhet i data och användning av konservativa antaganden kan studeras. Känslighetsanalyserna kan sedan utgöra underlag för att formulera beräkningsfall till den mer integrerade korrosionsanalysen i analysen av säkerhet efter förslutning. Arbetssättet med att först beskriva korrosionsprocesser i ett slutförvar och därefter göra mer eller mindre komplicerade kvantitativa uppskattningar av korrosionens omfattning, används även inom andra kärnavfallsprogram.

Nuläge

I flera moment av analysen av den referensutveckling som utgör en central del av säkerheten efter förslutning, studeras förlopp som är kopplade och ibland förekommer i sekvens, och där resultat från en modellstudie används som indata till en annan. Det främsta exemplet från korrosionsmodelleringen är den Excelmodell som beräknar buffertförlust i specifika deponeringshåll till följd av erosion och sedimentation (SKB TR-11-01). Samma modell används även för att beräkna korrosion vid de förhöjda sulfidflöden som uppkommer vid advektiva förhållanden, för de deponeringshåll där förlusten av buffert var tillräckligt omfattande för att leda till att advektiva förhållanden ska uppstå. Utdata i form av positioner för deponeringshåll där kapselbrott skett till följd av korrosion, används sedan i modelleringen av radionuklidtransport från dessa deponeringshåll med skadade kapslar. Den här modellen tar hänsyn till variationen av flödesförhållanden och sulfidkoncentrationer mellan förvarets cirka 6 000 deponeringshåll och hanterar därmed korrosionen ur ett förvarsperspektiv.

I Kanada har en översikt tagits fram (Hall et al. 2021), där fyra korrosionsprocesser utvärderas kvantitativt (korrosion från initialt syre, radiolytisk korrosion, anoxisk korrosion och mikrobiellt influerad korrosion) och ytterligare processer utvärderas kvalitativt. En sammanställning har gjorts över processer som kan producera respektive förbruka sulfid i slutförvarsmiljö (Behazin et al. 2021). Vidare har en 3D Comsol-modell använts för att studera inverkan av att inkludera vattenmättnadsprocessen och den initiala temperaturutvecklingen, med slutsatsen att dessa har liten betydelse för den totala sulfidkorrosionen (Rashwan et al. 2022). Inom det finska programmet har kapselns utveckling i förvaret beskrivits i en omfattande rapport (Posiva 2021a) där både korrosion och

mekaniska analyser ingår, varefter slutsatserna förs vidare i säkerhetsanalysen. Sulfidkorrosionen analyseras i säkerhetsanalysen också som en funktion av sulfidkoncentration och -flöde, i en omfattande modelleringsstudie (Posiva 2021b).

Arbete har pågått under många år med en kinetisk och mer mekanistiskt detaljerad modell för sulfidkorrosion, Copper Sulfide Model (CSM), se King and Kolář (2019) och King et al. (2021). Där beskrivs den senast utvecklade versionen som inkluderar korrosion från sulfid i grundvattnet, mikrobiell produktion av sulfid, den inledande oxiderande fasen, återmättnad och temperaturförloppet. Modellen har också jämförts med andra modeller i ett samarbete mellan SKB och Posiva (Posiva SKB 2021), se vidare avsnitt 11.4.2.

För lokal korrosion har en probabilistisk modell tagits fram, än så länge för oxiderande och mättade förhållanden (Briggs et al. 2020, 2021). Modellen hanterar osäkerheter i lokal kemi inklusive tiden för syreförbrukningen samt osäkerheter i litteratordata för korrosionspotentialer (avsnitt 8.1.2).

Den tidigare modellen för radiolytisk korrosion på utsidan av kapseln har vidareutvecklats med avseende på vilken oxidant som dominerar korrosionen (molekylärt syre istället för hydroxylradikal i tidigare modell), så att modelleringsresultaten nu bättre stämmer med experimentella data avseende omfattningen av oxidbildning (Soroka et al. 2021). Modellen har även utvecklats så att en mer realistiskt avtagande dosrat motsvarande sönderfallet av cesium-137 används. Vidare har också effekter av olika grundvattenkomponenter inkluderats i modellen (Jonsson 2021b). När det gäller den initiala bildningen av oxidanter på grund av radiolys av vatten, luft och argon inne i kapseln och konsumtionen av dessa, har processbeskrivningen blivit mer detaljerad och modellerna har uppdaterats, se även avsnitt 7.1.

Program

- En probabilistisk modell för lokal korrosion under oxiderande omättade förhållanden är under utveckling i samarbete mellan SKB, NWMO och Integrity Corrosion Consulting i Kanada. Modellen kommer att ta hänsyn till osäkerheter gällande mätnadsprocessen, relativ luftfuktighet, porvattnets sammansättning och den tid det tar för syrgas att förbrukas.
- I samband med att analysen av säkerhet efter förslutning uppdateras kommer SKB att på nytt se över hur olika modeller för korrosion används och om det finns fler processer som bör modelleras i större utsträckning. Närmast till hands ligger de olika delarna av korrosion i sulfid och att i en samlad modell beskriva filmtillväxt, lokal korrosion (inklusive mikrogalvanisk korrosion) samt den spänningsskorrosionslika processen som har observerats vid dragprovning i sulfidlösning.
- Den modell för radiolytisk korrosion på kopparkapselns utsida som tagits fram vid KTH, har utvecklats i flera steg och omfattar idag flertalet relevanta grundvattenkomponenter. Som anges i avsnitt 8.1.4 pågår sammanställning av arbetet och resultaten avses att publiceras i en vetenskaplig tidskrift.
- Modellen för den strålningskemiska miljön inuti en kapsel kommer fortsatt att utvecklas, se avsnitt 7.1, och kommer också att kunna användas i modellering av korrosion på kapselmaterialet i analysen av säkerhet efter förslutning.

8.2 Materialegenskaper kapselmaterialet

Kapsels insats är lastbärande för den mekaniska lasten, medan det omgivande kopparkapseln utgör korrosionsbarriär. En viktig process i analysen av kapselns integritet är inverkan av de förväntade omgivande trycken i slutförvaret. Dessa kommer att deformera kapselkopporna elastiskt, visköst genom krypdeformation och, om trycken är höga, även plastiskt. Med tanke på förvarets tidshorisont och att det är centralt att kapselmaterialets egenskaper inte förändras över tid, kommer extrapolering att krävas av resultaten från provning av krypdeformation. En fundamental förståelse och karakterisering av materialegenskaper behövs för en tillförlitlig extrapolering. Risken för väteförspredning av kapselmaterialet kan minskas genom kravställning och användning av väl karakteriserade kapselmaterialet, med låga halter väte och syre vid deponering. Gamma- och neutronstrålning kan inverka på kapselns materialegenskaper. För att minimera dessa risker, tillämpas även här väl underbyggd kravställning, modellering och extrapolering från experimentella data.

På samma sätt som beskrivs i avsnitt 8.1, syftar de aktiviteter som redovisas under program i detta avsnitt till att stärka underlaget till kommande analys av säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret och till att minska konservatismen i ett antal försiktiga antaganden som görs i analysen.

8.2.1 Kopparkrypning

SKB har valt att i kapseln använda en sort av syrefri koppar med låga halter av föroreningar. För att få gynnsamma krypegenskaper (tillräckligt hög duktilitet) görs en tillsats av fosfor och materialet benämns ofta Cu-OFP. Effekten av fosfor är belagd genom omfattande krypprovning, men för analysen av säkerhet efter förslutning behöver en bättre förståelse utvecklas (ända ner på atomnivå) för att visa att materialegenskaperna inte ändras över långa tider. SKB har sedan länge bedrivit utvecklingsarbete för att med modeller kunna beskriva kryppförlopp i koppar.

Nuläge

Modelleringen av krypdeformationen under den avslutande fasen före brott (tertiärkryp) inkluderades tidigare i modelleringen av kapselkopporn och har nu visats vara tillämpbar upp till 250 °C (Sandström och Sui 2021). I arbetet med extrapolation av krypbrottdata har också artificiella neuronät börjat användas och kopplat till det tas även metoder för felanalys fram. Användbarheten för angreppssättet att prediktera krypegenskaper med grundläggande modeller, utan att involvera ett antal passningsparametrar, har också demonstrerats genom att tillämpas på andra material och i andra tekniska tillämpningar. Ett exempel är prediktering av krypbrottdata för ett austenitiskt stål (Sanicro 25) med hög kryphållfasthet kring den kritiska temperaturen 700 °C, för avancerade typer av värmekraftverk (He och Sandström 2019).

Tid till krypbrott minskar med ökande temperatur och spänning, vilket gör att krypbrott är osannolikt för kapseln i slutförvaret eftersom temperatur och spänningar är låga. För att undersöka bakomliggande mekanismer och visa på marginaler, har SKB tidigare mätt tid till krypbrott i kapselkoppar vid högre temperaturer och spänningar än de som förväntas i slutförvaret. Mätningarna har möjliggjort empirisk modellering och mekanistiska studier. Empiriska krypbrottmodeller kan rimligt beskriva degradering över tid och är nödvändiga när försök ska planeras.

I arbetet med att med hjälp av kvantkemiska beräkningar studera effekten av hur föroreningsatomer samverkar med korngränser, har fler typer av korngränser inkluderats (Lousada och Korzhavyi 2020a) och bindningsenergin har uppskattats för svavel och fosfor. Resultaten från dessa beräkningar har sedan tillämpats i modellering av kavitetsbildning i Cu-OFP (Sandström och Lousada 2021). Det underlag som använts till att inkludera fler typer av CSL-korngränser (CSL, Coincidence Site Lattice) kommer från preliminära utvärderingar av fördelningen av korngränser med hjälp av Electron Backscatter Diffraction (EBSD) som utförts hos Swerim på SKB:s Cu-OFP (Hagström et al. 2020) och som visade att sigma9-korngränser är vanligare än vad som tidigare visats för koppar (Mishin et al. 1997).

Ytterligare omfattande kvantkemiska beräkningar har genomförts och förbereds för publicering. Preliminära resultat visar till exempel att sigma9-korngränsen (som är vanlig) och sigma5-korngränsen (som har speciella egenskaper) kan fungera som kraftiga sänkor för vakanser och dessa är i sin tur nödvändiga för segregation av fosfor- och svavelatomer till korngränser.

Fosfors inverkan på krypegenskaperna hos koppar har fortsatt studerats experimentellt. Efter en inledande studie av rekristallisation (Sundström et al. 2020) har arbetet fortsatt med en mer systematisk provning av material från rör och vid temperaturer framför allt mellan de tidigare provade, det vill säga i intervallet 230–255 °C. Eftersom Auger-spektroskopi på krypprovnat material visat på partiklar av fosfor (Sundström et al. 2020) har även dessa studier fortsatt, och nu även med transmissionselektronmikroskopi (TEM). Syftet var att vidare undersöka hypotesen att just deformerat material innehåller anrikning av fosfor, vilket preliminärt bekräftats. Metoden att använda långsam dragprovning vid olika temperaturer har också använts på ett material med förhöjd halt av zink, vismut och tellur (cirka 5 vikt-ppm av varje), vilket visar på en något minskad duktilitet jämfört med Cu-OFP (Andersson-Östling och Sundström 2021). Krypprovning av materialet pågår för att ge en mer komplett bild av vad den långsamma dragprovningen kan visa med avseende på materialegenskaperna. SKB:s resultat från krypprovning 1985–2018 har sammanställts från olika underlagsrapporter och publicerats i en samlad rapport (Andersson-Östling 2020).

Program

- Med hjälp av den utökade serien av rekristallisationsdata kommer en rekristallisationsmodell, utgående från Avrami-ekvationen (IUPAC 1997), att tas fram och användas för extrapolation till slutförvarstider. Om rekristallisation inte kommer att ske, förväntas därigenom inte heller att koppars materialegenskaper ändras.
- Studien av fosforanrikning kommer att färdigställas. Fortsatta planer inkluderar bland annat studier av om diffusion av fosfor kan förklara anrikningen vid deformation. Faktorer som kan varieras är halt fosfor i materialet, liksom temperatur och tid för krypprovning. Partiklar kan studeras med TEM, medan Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy (GDOES) troligen kan användas för att mäta fosforhalten.
- Krypprovningen av materialet med något förhöjd halt av zink, vismut och tellur kommer att slutföras och dokumenteras.
- På SKB:s uppdrag pågår en systematisk studie med EBSD på Swerim, på prover från olika positioner på två kopparrör och ett lock, med proverna tagna i olika riktningar. Proverna är relativt stora (20×50 mm) och representerar hela tjockleken på rör och lock. Mätningarna ger fördelningar av CSL-korngränser, kornstorlek och kristallplan, liksom bilder på detta. Den utvecklade metoden kan sedan användas i mer fokuserade studier.
- De kvantkemiska beräkningarna av den relativa stabiliteten hos olika atomära defekter i koppars struktur fortsätter vid KTH Materialvetenskap. Där kommer även diffusionen av fosfor-, svavel- och väteatomer i koppar, liksom koppars självdiffusion att undersökas.
- Sammanställningen av det mångåriga arbetet med utveckling av krypmodeller som utförs av Rolf Sandström, KTH, kommer att publiceras.
- SKB planerar att mäta tid till krypbrott för provtillverkad kapselkoppar vid hög temperatur och höga spänningar. Resultaten kommer att användas för att justera SKB:s empiriska modeller som används vid praktisk krypprovning och driftsituationer. Även inverkan av mindre variationer i kapselkopparns sammansättning, struktur och kornstorlek kan utvärderas vid försöken.

8.2.2 Väteförsprödning i koppar, segjärn och stål

Väte kan i metaller förekomma både atomärt (H) eller som molekyler (H_2). Om koncentrationen av väte är tillräckligt hög kan det påverka metallens mekaniska egenskaper negativt. Atomärt väte kan bindas till olika typer av defekter och föroreningar i materialet. Det kan också bilda molekyllärt, gasformigt väte i mikroskopiska porer inuti materialet, vilket kan ha en negativ effekt på materialets mekaniska egenskaper (väteförsprödning).

Segjärn och låglegerade stål har en rymdcentrerad kristallstruktur (bcc) och väteförsprödning kan förekomma. Risken för väteförsprödning ökar med metallegeringens hållfasthet och närvaro av dragspänningar i konstruktionen. Koppar och många andra metaller och legeringar med ytcentrerad kristallstruktur (fcc) är mindre benägna att drabbas av väteförsprödning.

Kraven på den syrefria koppar som används för kapslarna tjänar till att förhindra väteförsprödning och även den form som brukat kallas vätesjuka (där vätet reagerar med syre i form av oxid och bildar vattenånga). Utgångsmaterialet för kopparkapslarna ska vara tillräckligt rent för att väteförsprödning inte ska utgöra något problem. Det behöver ändå säkerställas att materialet inte påverkas vid svetsning av kapslarna eller i slutförvaret (genom radiolys eller korrosion) på ett sådant sätt att väteförsprödning skulle kunna uppstå och påverka kapselegenskaperna negativt.

Nuläge

Lösligheten av väte i koppar är mycket låg (Magnusson och Frisk 2017) och för att studera om väte påverkar materialegenskaperna måste man tvinga in väte i metallen. Det har dock visat sig svårt att få in några större mängder, annat än ytligt (Leijon et al. 2018) och likaså att tillförlitligt mäta halten på olika ställen i materialet (Granfors 2017).

I några försök har man observerat måttliga ökning av vätehalten då koppar i vatten utsatts för en stråldos motsvarande den som materialet kommer att utsättas för i slutförvaret. I dessa försök

observerades ytliga korrosionseffekter, men ingen porbildning på djupet. För en mer detaljerad redogörelse, se Kapselkompletteringen.

De omfattande kvantkemiska beräkningar som utförts för att bättre förstå hur väte interagerar med kopparmetallens ytor, med dess inre kristallstruktur samt med korngränser, har nu publicerats i vetenskaplig tidskrift (Lousada och Korzhavyi 2020b). Som tidigare angivits visar beräkningarna bland annat att även om kopparytan vore helt belagd med väte, blir koncentrationen inne i metallen mycket låg. Arbetet har sedan fortsatt med studier av vätes segregation till och diffusion i korngränser (sigma9 och sigma5, se vidare avsnitt 8.2.1) jämfört med matrisen i ett kristallkorn i kopparn.

Risken att väte tränger in och påverkar kopparmaterialets egenskaper på djupet har dessutom analyserats på teoretisk väg med utgångspunkt från diffusionsberäkningar, se Kapselkompletteringen. Resultaten visar att flödet av sulfid (H_2S/HS^- som vätekälla) under förvarförhållanden är för litet för att det väte som frigörs ska ge någon signifikant påverkan på kapslarna. Trots detta finns åtminstone en studie där resultaten tolkats som att väte trängt in i och interagerat med kopparmaterialet, men då under betydligt högre flöden av sulfid än de som kan uppkomma under förvarförhållanden (Zhang et al. 2021). Denna tolkning har inte grundats på detektion av väte, utan bygger på mätningar av små förändringar i kopparmaterialets kristallstruktur efter sulfidexponering. Även det referensprov som oxiderats vid förhöjd temperatur uppvisar skiftningar i kristallmatrisen på samma provdjup som de sulfidexponerade proven.

Frågan om väteförspredning i segjärn har också tagits upp och analyserats, även om det experimentella underlaget är begränsat och i huvudsak består av inladdning av väte i metallen med elektrokemiska metoder i relativt aggressiva lösningar (Martinsson et al. 2009, Wu et al. 2015, Forsström et al. 2019, Sahiluoma et al. 2021). Vätet har konstaterats tränga in ytligt och även gå ut ur materialet igen.

Materialet har också samtidigt drag- eller kryppprovats, vilket ökar inladdningen av väte (Sahiluoma et al. 2021), men kryppprovning efter väteladdning ökar även utflödet (Martinsson et al. 2009). Materialegenskaperna ändras i form av minskad duktilitet, men också en något minskad sträck- och brottgräns (Martinsson et al. 2009, Forsström et al. 2019, Matsuno et al. 2012). Bindningen av vätet i materialet har studerats med Thermal Desorption Spectroscopy (TDS) och kan relateras till två energimässigt olika typer av ”fällor” (Sahiluoma et al. 2021), relaterade till små hålrum och defekter (lägre vätebindningsenergi) respektive lagring i grafitnoduler (högre vätebindningsenergi). Endast små mängder väte förutses dock vara tillgängligt under förvarförhållanden, och experiment med exponering i destillerat vatten, vilket mer liknar förvarförhållanden än de aggressiva lösningarna använda för att introducera vätet, visar på duktila brottmekanismer (Forsström et al. 2019, Sahiluoma et al. 2021).

Program

- Väteinträngning och -diffusion i koppar studeras med en typ av Devanathan–Stachurskicell inom konsortiearbetet vid CanmetMATERIALS, Kanada (avsnitt 8.1.1).
- Studier pågår vid VTT, Finland, för att kvantifiera eventuell väteladdning i koppar till följd av sulfidexponering under dragspänning, se avsnitt 8.1.5 om spänningskorrosion.
- Arbete pågår även för att bättre säkerställa noggrannheten hos mätningar av väte i koppar.
- De kvantkemiska beräkningarna vid KTH Materialvetenskap fortsätter, dels med avseende på hur väte interagerar med dislokationskärnor (ger kunskap om diffusion och segregation), dels för att bättre förstå hur vakanser injekteras i kopparn vid bildning av en kopparsulfidfilm och hur det samverkar med väte.
- SKB ser över behovet att gränssätta och analysera mängden väte i insatsmaterialen.

8.2.3 Strålningseffekter på koppar, segjärn och stål

I en underlagsrapport (SKB TR-10-46) till säkerhetsanalysen SR-Site drogs slutsatsen att de stråldoser som kapselmaterialen kommer att utsättas för, ger försumbara effekter på kapselns mekaniska egenskaper. Detta bygger i huvudsak på tidigare beräkningar av strålskador i materialen till följd av gamma- och neutronstrålning.

Gamma- och neutronstrålning kan också verka försprödande på segjärnets materialegenskaper, genom utfällning av kopparpartiklar eller bildning av Late-Blooming Phases (LBP), eller genom att påverka diffusionen av till exempel fosfor till korngränser. Omfattningen av utfällning av kopparpartiklar behöver studeras så att väl underbyggda krav kan ställas på maximalt tillåten kopparhalt i järnmaterialet.

Nuläge

SKB redovisade i Kapselkompletteringen uppdaterade beräkningar av strålskador, liksom experiment med gammabestrålning, men har därefter inte genomfört några ytterligare studier. Modelleringsarbetet vid KTH Reaktor fysik har dock fortsatt (Yang et al. 2022). Modellen för att beräkna utfällning av kopparpartiklar i segjärn kan nu användas för att bekräfta SKB:s kravställda gräns på max 0,05 procent koppar i segjärnet för att undvika försprödning.

Program

- SKB planerar inga ytterligare studier av strålningseffekter på kapselmaterialet inom Fud-perioden.

8.2.4 Åldring hos segjärn och stål

Järn och stål löser in kol och kväve som är lätttrörliga atomer, och atomerna kan bilda atmosfärer kring deformationer och bromsa vidare deformation. Järn och (ferritiska) stål kan genom denna åldringseffekt bli hårdare och mindre segt vid lagring efter avkylning, gjutning eller deformation.

Nuläge

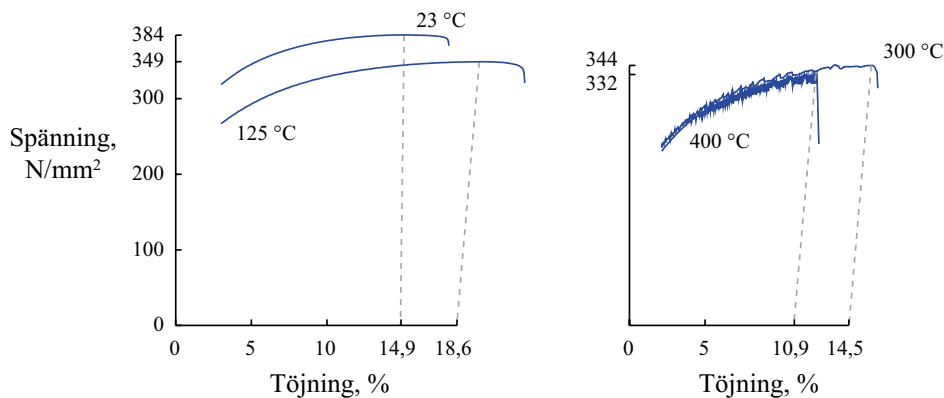
Dynamisk åldring kan uppkomma vid dragprovning vid förhöjd temperatur och den identifieras som ojämnheter i dragprovskurvan och kallas Portevin–Le Chatelier-effekten. Förenklat kan ojämnheterna hänföras till att inlösta ämnen interagerar med den fortgående deformationen av metallens kristallkorn, och både ämnens diffusion och deformation är temperaturaktiverade. Denna effekt kan ge en viss minskning av materialets seghet (försprödning).

Åldring påverkas förutom av halterna av lösta atomer, deformation och deformationshastighet även av kapselns temperatur. Flera nya rapporter om kapselns temperatur och temperaturen i kapselns närfält har nyligen publicerats (Ikonen 2020, Renström 2020, Jansson et al. 2022b), med slutsatserna att insatstemperaturen påverkas främst av spalterna samt bentonitens konduktivitet. Dessutom sker temperaturökningen utanför kapseln främst genom ledning och bara till viss del av direkt energi-deponering av gammastrålning.

Segjärn är vidare den form av gjutjärn som är mest tålig mot deformationsåldring och försprödas först vid 300–400 °C (Yanagisawa och Lui 1983). Efter en genomgång av tillgänglig litteratur och av lastfallen i slutförvaret bedömde SKB (2017) att varken statisk eller dynamisk deformationsåldring påverkar kapselinsatsens mekaniska egenskaper eller funktioner i slutförvaret. Dels krävs plasticiserande laster för att fenomenen ska uppstå, medan kapselinsatsen är dimensionerad så att plasticering inte uppnås utom i osannolika fall, dels förväntas inte högre temperatur än cirka 100 °C i slutförvaret. Det är betydligt lägre än de temperaturer vid vilka särskilt dynamisk åldring uppträder.

I tillägg till bedömningen från 2017 har SKB utvärderat kylåldring, dynamisk och statisk deformationsåldring och eventuell sprödhet genom dragprovning av segjärn från provtillverkade insatser (Sarnet 2022). Som framgår av figur 8-2 kan dynamisk deformationsåldring med taggar i dragprovskurvan bara observeras vid 300–400 °C för SKB:s segjärn (Sarnet 2022). Inga tecken på dynamisk deformationsåldring ses upp till 125 °C. Brottgränsen är högst vid rumstemperatur, 384 N/mm². Brottgränsen vid 300 °C är lika hög som vid 125 °C som en effekt av den dynamiska deformationsåldringen vid 300 °C. De streckade linjerna visar materialets elastiska komponent, så att förlängningen kan bestämmas från maximal spänning på spänning–töjningskurvan. Förlängningen är som högst för mätningarna vid 125 °C och lägst för mätningarna vid 400 °C, 18,6 respektive 10,9 procent.

Statisk deformationsåldring kräver en kraftig fördeformation, tre procent förlängning som är flera gånger högre än elasticitetsgränsen. Det har inte kunnat visas att förlängningen försämras med ökad statisk deformationsåldring (Björklund 2021, Sarnet 2022).



Figur 8-2. Spänning–töjningskurvor för SKB:s segjärn vid fyra temperaturer (Sarnet 2022).

Program

- SKB planerar att komplettera undersökningarna av draghastighetens och temperaturens inverkan på dynamisk åldring och fördeformationens inverkan på statisk åldring för kapselinsatsen. Dessutom kan faktorerna kvävehalt och metallstruktur varieras vid försöken.

8.3 Konstruktion

Nuläge

Kraven på sammansättningen av materialet för kopparhöljet har väsentligen varit desamma sedan de först specificerades i Werme (1998). Grunden för kraven är materialbeteckningen Cu-OFE (SS-EN 1976:2012), vilken även specificerar krav på föroreningar som exempelvis nickel och järn. De senaste publicerade och nu gällande konstruktionsförutsättningarna (Posiva SKB 2017) anger syrehalten till maximalt 5 vikts-ppm, vilket är en uppdatering från vad som angavs i ansökan (SKB TR-10-14), men samma som i Werme (1998). Övriga krav på materialsammansättning är oförändrade sedan ansökan. Vidare lägger SKB till ett krav på minsta sträckgräns för kopparmaterialet för att säkerställa att tänkt hantering av kapseln inte påverkar dess egenskaper.

SKB redovisade i Fud-program 2019 att en uppdaterad designanalys av kapseln utarbetats. Utifrån dessa beräkningar har utformningskraven med avseende på mekaniska egenskaper i insatsen ytterligare specificerats. Mer specifikt har utformningskraven diversifierats för centrala delar som inte tar någon last, så att inget krav ställs på brottförlängning i ett cirkulärt område med radien 100 mm i centrum av insatsens tvärsnitt (Posiva SKB 2018). Utöver de mekaniska egenskaperna har tillverkningskrav på mikrostruktur ytterligare specificerats för de parametrar (grafit och perlit) där en direkt koppling till materialets egenskaper identifierats.

För att säkerställa att insatsen är tillräckligt tät så att kravet på gastäthet i Clink kan uppfyllas, krävs en tätning till insatsens stållock. I tidigare redovisad design består denna tätning av en traditionell o-ring av gummi, vilket inte uppfyller de övergripande kraven att kapseln inte ska innehålla organiska material. Därför har alternativ design av både stållocket och dess tätning utvärderats. Grundprinciperna i den nya designen är ett skruvförband i lockets periferi istället för en centrumbult och att en planpackning placeras i detta skruvförband med liknande principer som för en topplockspackning.

Program

- För kopparhöljet genomförs nya utredningar rörande den största kvarstående deformation som höljet kan komma att utsättas för. Tillåtna hanteringslaster utreds, liksom tillåten storlek på hanteringsdefekter i kopparhöljet.
- Effekterna av dragspänning i kopparlocket undersöks och vid behov kommer den detaljerade kapselutformningen att optimeras.

- Utarbetning av krav på renhet i kopparhöljet och hur kravet ska verifieras i produktion.
- Kraven med avseende på acceptabla defekter för kapselns olika delar som indata till kvalificering av oförstörande provning, specificeras vidare.
- För kapselns insats drivs ett projekt med syfte att utveckla en alternativ konstruktion av insatsen som möjliggör robust tillverkning och enklare kontroll och provning. Projektet omfattar alternativ konstruktion där insatsen tillverkas utan ingjuten stålkassett och alternativa konstruktioner som tillverkas av konventionella standardprodukter. I samband med denna utredning görs en översyn av tillverkningskraven för insatsen.

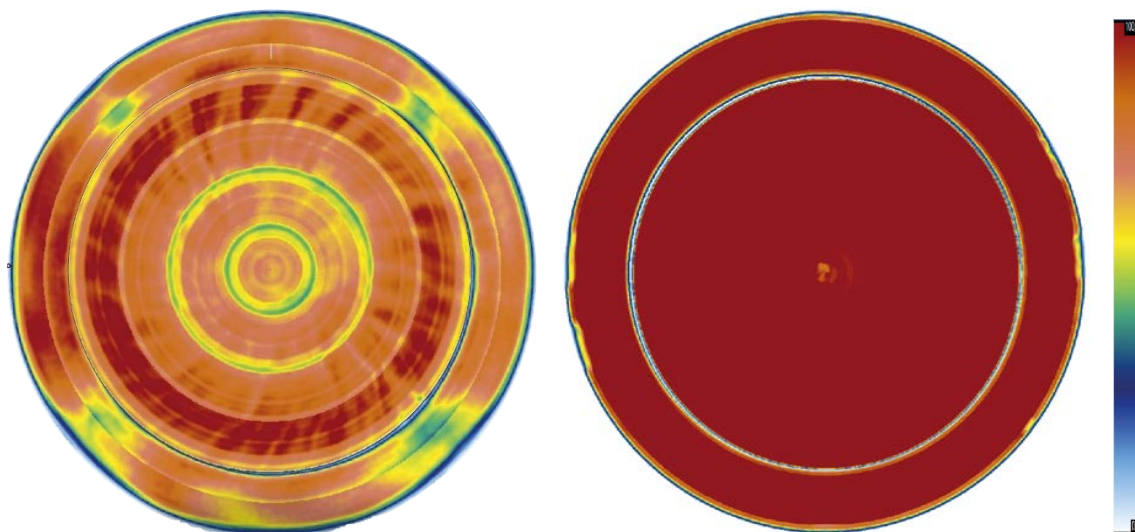
8.4 Tillverkning, kontroll och provning

8.4.1 Tillverkning av koppardelar

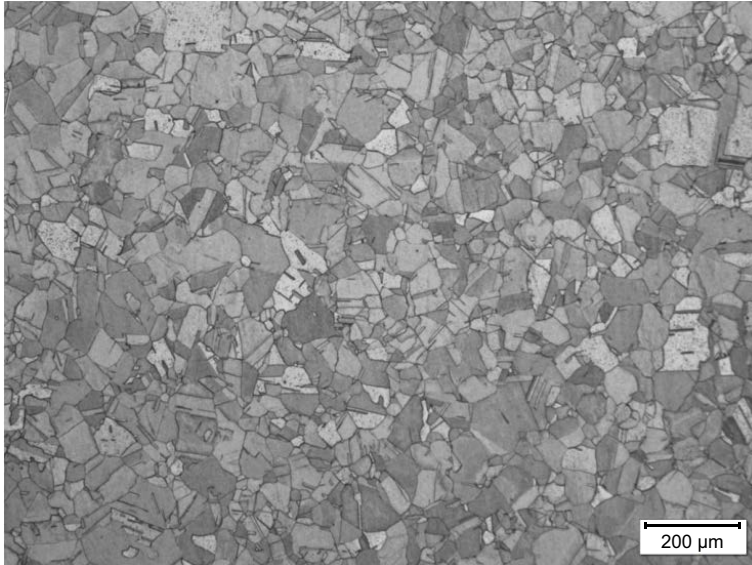
Nuläge

I Fud-program 2019 redovisades att SKB identifierat variationer i kornstorlek och förekomst av smidesveck vid smide av kopparlock. Som följd av detta har SKB vidareutvecklat smidesprocessen. Tillverkningen görs som tidigare med sänksmide, och genom att utnyttja betydligt större krafter än tidigare har processen kunnat förenklas till användning av ett enklare smidesverktyg och färre processteg. Bland annat har det avslutande steget med räcksmede, som i den tidigare processen orsakat de smidesveck som uppkommit, exkluderats.

Tillverkning av kopparlock med den optimerade processen har resulterat i komponenter som väl uppfyller kraven på geometri och materialstruktur. Ultraljudprovning av tillverkade lock pekar på en homogen låg ljuddämpning i hela volymen, vilket indikerar en homogen finkornig materialstruktur som i sin tur möjliggör en god provbarhet. I figur 8-3 visas typexempel på hur variationer i materialstrukturen indikeras genom ultraljudprovning av lock tillverkat dels med ursprunglig smidesprocess, dels med optimerad smidesprocess. För att kvantifiera kornstorleken har ett antal prov tagits ur några av de tillverkade locken, och resultaten bekräftar en homogen och finkornig materialstruktur med en medelkornstorlek på 60–120 μm , se figur 8-4.



Figur 8-3. Resultat från ultraljudprovning med 3,5 MHz arraysökare av kopparlock, TX250 till vänster (ursprunglig smidesprocess) och TX261 till höger (optimerad smidesprocess). Data presenteras i form av C-scanbilder för bottenekoamplitud, där hög amplitud indikerar låg ljuddämpning och därmed ett finkornigt material.



Figur 8-4. Resultat från kornstorleksmätning av prov från kopparlock TX261.

För utveckling av processen för tillverkning av kopparrör har ytterligare kopparrör extruderats. Syftet har varit att samla ytterligare information om lämpliga processparametrar och underbygga tidigare utprovade temperaturer för de olika stegen i varmformningsprocessen. Dessa försök har visat att ytterligare arbete krävs för att säkerställa inom vilka gränser som olika processparametrar ska tillåtas variera. För den alternativa tillverkningsmetoden dornpressning sker för närvarande ingen utveckling.

Program

- Genomföra processkartläggningar för att få underlag att kunna genomföra försöksplanering av processparametrar som i sin tur kommer att ligga till grund för kommande kvalificering av tillverkningsprocesserna för hela tillverkningskedjan för kopparkomponenter.
- Implementera en optimerad process för extrusion av kopparrör.
- Genomföra tillverkningsförsök med syfte att ta fram underlag för processfönster för processparametrar vid de olika stegen vid extrusion av kopparrör.
- Genomföra initiala försök för att utvärdera alternativa tillverkningsmetoder för kopparrör för att säkerställa tillgång till alternativa leverantörer under produktion.
- Genomföra tillverkningsförsök med syfte att ta fram underlag för processfönster för temperatur vid smide av kopparlock.
- Utarbeta provprogram avseende förstörande provning med syfte att identifiera behov av provning vid kvalificering och produktion av kopparkomponenter.
- Översyn av system för hantering av kopparkapseln.

8.4.2 Tillverkning av insats

Nuläge

Ett omfattande provningsprogram har genomförts för de senaste tre tillverkade BWR-insatserna respektive två senaste PWR-insatserna. Provningsprogrammet har bland annat innefattat oförstörande provning av både intakt insats och provskivor samt förstörande provning av prover från kontrollskiva ur överlängd och från provskivor från insatsens volym. Materialprovning visar att krav på brottseghet och sträckgräns uppfylls i provade positioner. Däremot finns osäkerheter gällande främst brottförlängning, men även brottgräns. Utöver detta har vissa defekter indikerats som i storlek bedöms vara på gränsen till vad som kan accepteras.

Ändrade tillverkningskrav har införts för stålkassetten efter gjutning. Dragprovning av material från stålkassetten kanalrör efter gjutning har visat att egenskaperna inte uppnår de nya kraven avseende sträckgräns och brottförlängning. För att utreda orsakerna till försämrade materialegenskaper i segjärnet mellan kanalrör samt i stålkassetten kanalrör efter gjutning, har experimentella studier av kontraktion och expansion av gjutjärn som funktion av svalningshastighet utförts. Numerisk modellering av spänningsbilden i segjärnsinsatser till följd av termisk utvidgning samt strukturundersökning och fraktografi av segjärn och stål har inkluderats. Experimenten visar att små mikrosprickor bildas vid hög temperatur och att huvudorsaken är att segjärnet respektive stålet i kassetten expanderar och kontraherar olika vid temperaturväxlingar. Analys av mikrostrukturen visar att kol har diffunderat från segjärnet till stålet, på grund av en koncentrationsgradient mellan de två materialen. Koldiffusionen medför att materialegenskaperna ändras både i stålet och i segjärnet. Stålets mikrostruktur förändras och materialet tappar seghet. I segjärnet kommer kisel segra till de avkolade zonerna i närheten av kanalrören och materialet förväntas bli sprödare. Dessa resultat pekar på behov av fortsatt teknik-utveckling och utredningar för att reducera osäkerheter kring tillverkning av insatser.

Program

- Genomföra processkartläggningar för tillverkningskedjan av kapselns insats.
- Utveckling av alternativa metoder för tillverkning av insatsen där kanalrören skapas utan ingjuten stålkassett.
- Utvärdering av tillverkning av alternativa insatskonstruktioner baserat på standardiserade och väl utprovade material.
- Genomföra detaljkonstruktion av den nya designen för lockutformning med skruvförband och planpackning.
- Utarbeta provprogram avseende förstörande provning med syfte att identifiera behov av provning vid kvalificering och produktion av insatser.

8.4.3 Svetsning av kopparhöljet

Nuläge

Utvecklingsarbetet för svetsning av lock på kopparrör har fokuserat på produktionsanpassning inklusive enklare foggeometri, fastställande av toleranser för lock/rör-passning, utveckling av invändigt gasskydd och kvalitetssäkring av tillverkning av svetstappar. För att undersöka toleranser för passning mellan lock och rör samt för att förenkla foglinjegeometrin, sker sedan 2019 svetsning i en ny rak och svagt lutande foglinjeutformning (i stället för den nuvarande referensutformningen med en klack i). Både oförstörande och förstörande provning visar på likvärdiga resultat som med den nuvarande referensutformningen.

Utvändigt gasskydd har varit funktionellt under lång tid av svetsutvecklingen och eventuellt behov av invändigt gasskydd för att minimera risken för oxidpartiklar i svetsroten har identifierats.

De två svetstappar som har testats avseende livslängd/säkerhetsfaktor mot brott höll fyra fullvarvsvetsar vardera, men ett omfattande arbete genomförs för närvarande för att säkerställa att alla tappor har samma egenskaper genom att kvalitetssäkra bearbetningen, värmebehandlingen och ytbehandlingen av tapparna.

De fullvarvsvetsar som genomförts enligt referensproceduren har sammanställts i en rapport för att beskriva processfönster för de olika inmatnings- och resultatparametrarna. Denna rapport ska användas som underlag vid kvalificering av svetsprocedur, då kvalificeringen planeras att genomföras genom så kallad utfallsprovning (enligt ISO 15613).

Program

- Ett kvalificeringssamarbetsprojekt har initierats med Posiva och ett ackrediterat kvalificeringsorgan för att kvalificera en svetsprocedur för svetsning av kopparbotten på kopparröret och en svetsprocedur för förslutningssvetsen.
- Kompletterande förstörande provning av svetsgods.
- Utprova och implementera invändigt gasskydd (i form av en så kallad svetskatt) i FSW-maskinen vid Kapsellaboratoriet (FSW, friktionssvetsning).
- Ta fram övre gränsvärde för syrehalt i invändigt gasskydd.

8.4.4 Kontroll och provning

Nuläge

SKB har genomfört en analys avseende hur principerna i SSM:s föreskrift (SSMFS 2008:13) kan tillämpas för kravställning och provning av kapseln. Bedömningen är att vissa delar av föreskriften kan användas, men anpassningar behöver göras eftersom provningen av kapseln inte görs med avseende på driftsinducerade defekter och endast ett begränsat antal objekt ska provas under lång tidsrymd i specialanpassade provningssystem.

Tekniken för ultraljudprovning av kopparkomponenterna har vidareutvecklats med stöd av omfattande simuleringar med den etablerade kommersiella programvaran CIVA. Baserat på simuleringarna och praktiska försök har optimerade arraysökare utvecklats och utifrån dessa har anpassade provningsinställningar för kopparröret utprovats.

Förekomsten av verkliga defekter på kopparkomponenterna har varit sällsynta. Ett begränsat antal ytbrytande defekter i form av veckbildning i ytan har dock identifierats. För att få en tydlig bild över defekternas karakteristik, har några genomgått en omfattande analys. De har i flera steg provats med ultraljud, röntgen och virvelströmsteknik. Baserat på resultaten har sedan ett antal mindre prov kapats ut för vidare undersökning med högupplöst datortomografi och konventionell metallografi. Resultaten från dessa undersökningar används sedan för utveckling av virvelströmsteknik för kopparrörets utsida och de plana sidorna på kopparlocket. Utvecklingen har gjorts genom att studera signalrespons från artificiella defekter i form av gnistade spår och från verkliga defekter i form av veckbildning. Dessutom har CIVA-simuleringar gjorts för att studera effekten av vissa defektparametrar.

För provning av kopparrörets FSW-svetsar har en ny röntgenutrustning driftsatts vid Kapsellaboratoriet. I specifikationen av utrustningen har utprovning av olika röntgenkonfigurationer (strålningsenergi och detektortyp) undersökts och optimerats. Med den nya utrustningen har sedan parameterförsök genomförts, vilket har gjort att anpassade provningsinställningar för svetsutrustningen har kunnat utvecklas.

Program

- Detaljering av krav och förutsättningar för kvalificering med utgångspunkt från tillämpliga delar av konsoliderad SSMFS 2008:13.
- Utarbetande av förslag till plan för kvalificering.
- Vidareutveckling av teknik för ultraljudprovning av kopparlock och botten, för virvelströmsprovning av kopparlock, kopparbotten och kopparrörets insida och för ultraljudprovning av kopparrörets svetsfogar.
- Analys av möjligheter att använda virtuella defekter för utbildning och kvalificering av personal.
- Utveckling av anpassad ultraljudteknik för provning av kapselns insats.
- Utveckling av metod för mätning av oxidskikt på kopparytan med hjälp av färgskillnader efter svetsning.
- Utveckling av metoder för kontroll med avseende på hanteringsskador på kapselytan.

9 Cementbaserade material

I SFR förekommer stora mängder cementbaserade material i avfallsmatriser, tekniska barriärer och andra konstruktioner. Detta gäller även för det koncept för SFL som genomgått säkerhetsvärdering liksom för Kärnbränsleförvaret, där cementbaserade material planeras i pluggar, injekteringsmaterial och material för bergförstärkning.

I detta kapitel redovisas SKB:s program rörande cementbaserade material för de tre slutförvaren. Programmet för forskning som syftar till ökad förståelse av processer redovisas gemensamt för de tre slutförvaren (avsnitt 9.1) då resultaten uppnådda inom detta program ofta är relevanta för samtliga slutförvar. Programmen för utformning och produktionsmetod för andra material, redovisas däremot separat för SFR (avsnitt 9.2) och Kärnbränsleförvaret (avsnitt 9.3), då aktuella frågeställningar är mer anläggningsspecifika även om vissa beröringspunkter finns. Då vidare arbete med SFL har flyttats fram i tiden, redovisas inte något separat program rörande utformning, material och produktionsmetod för SFL i detta kapitel.

9.1 Cementbaserade material – utveckling efter förslutning

I detta avsnitt beskrivs den forskning som SKB planerar att genomföra för att öka förståelsen rörande hur de cementbaserade materialens funktion och egenskaper förändras i slutförvarsmiljö under de tidperioder som säkerhetsanalyserna omfattar.

9.1.1 Grundvattnets inverkan på cementbaserade material

Cementbaserade material som kommer i kontakt med grundvatten påverkas av vattnets kemiska sammansättning samt av vattenflödets storlek och riktning. Upplösning eller utfällning av mineral förändrar betongens mineralsammansättning, vilket i sin tur påverkar materialets hydrauliska, mekaniska och kemiska egenskaper. Detta leder vidare till förändringar i betongkonstruktionernas hållfasthet och sorptionskapacitet för radionuklider, men även förändringar i masstransportegenskaper kan förväntas.

Nuläge

SKB har under årens lopp låtit genomföra ett flertal studier rörande utvecklingen av egenskaperna hos betongkonstruktionerna i SFR. De två senaste utgörs av Höglund (2018, 2019) där pH-utvecklingen i 2BMA och 1BRT under de första 100 000 åren efter förslutning studerades. I överensstämmelse med tidigare studier inom detta forskningsområde visade båda dessa studier att nedbrytning av betong genom upplösning eller omvandling av cementmineralerna under slutförvarsbetingelser är en mycket långsam process, men även att förutsedd pH-utveckling påverkas av val av beräkningsparametrar. Studierna visade att ett pH överstigande 12 (2BMA) respektive 11 (1BRT) kan förväntas under hela analysperioden, alltså 100 000 år.

SKB har under de senaste Fud-perioderna låtit utveckla ett beräkningsverktyg för reaktiv transportmodellering i sprickiga system (Nardi et al. 2014). Vidareutveckling av beräkningsverktyget skulle kunna möjliggöra studier av utvecklingen av transportegenskaperna hos betong med förekomst av sprickor.

Sprickbildning i betongkonstruktionerna kan leda till att en ökad andel av det grundvatten som tränger in i avfallsdomänen sker genom sprickorna i stället för genom betongmatrisen. Detta medför att det inträngande grundvattnet inte i samma utsträckning interagerar med betongens porvatten innan det når avfallsdomänen. Konsekvensen av detta kan därför bli en förändring av den kemiska miljön i avfallsdomänen, till exempel ett initialt lägre pH och lägre koncentrationer av species härrörande från upplösning av cementmineraler, något som exempelvis kan påverka korrosionshastigheten hos de metalliska material som förekommer i avfallet.

Program

Mot bakgrund av de resultat som erhöles i de studier som genomfördes inom ramen för SFL Säkerhetsvärdering och som redovisades i Fud-program 2019, avser SKB att fortsätta att utveckla sitt program för studier av interaktioner mellan grundvatten och betong under slutförvarsbetingelser. Programmet är i dagsläget inte slutligt fastlagt. Av möjliga utvecklingsområden som identifierats är följande värda att nämnas:

- Studier av hur materialens mineralsammansättning utvecklas som funktion av utfällnings- och upplösningsreaktioner och hur denna utveckling kopplas till mekaniska processer.
- Studier av egenskaper hos betong med olika bindemedelssammansättning.
- Utveckling av egenskaper hos material i systemen för gasavledning över tid.
- Studie för ökad förståelse av pH-utvecklingen i bergssalarna 1–2BTF.

9.1.2 Modellering av gastransport

Under perioden efter förslutning kan olika typer av gaser bildas genom nedbrytning av i SFR och SFL förekommande material (avsnitt 6.2). I det fallet att dessa gaser inte kan transporteras ut genom betongkonstruktionerna, skulle ett inre tryck kunna byggas upp och påverka betongkonstruktionernas strukturella integritet.

Nuläge

Sedan insatserna rörande modellering av gastransport genomfördes, vilka redovisades i Fud-program 2019, har SKB låtit genomföra en uppdatering av modellen för gasproducerande processer. Arbetet är dock ännu inte slutrapporterat.

Program

SKB:s program för studier kopplade till modellering av gastransport:

- Slutrapportering av uppdateringen av modellen för gasproducerande processer.
- Utveckling av modeller för gas- och vattenflöde i närzonen i SFR.
- Med genomförda modelleringar som underlag, genomföra bedömningar rörande hur olika typer av gasavledningssystem kan utformas så att de i så liten omfattning som möjligt påverkar radionuklidtransporten. Se även avsnitt 9.2.2.

9.1.3 Påverkan från nedbrytning av organiskt avfall

Organiskt material som bryts ned i en cementmatris kan påverka egenskaperna hos de cementbaserade materialerna. Detta kan förändra porvattnets sammansättning, men även påverka betongens förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider genom exempelvis bildande av komplexbildande ämnen.

Nuläge

Inom projektet Concrete and Clay, vilket drivs av SKB i Äspölaboratoriet sedan 2010 (Mårtensson 2015), studeras bland annat vilka typer av nedbrytningsprodukter som bildas från olika typer av organiskt material representativa för låg- och medelaktivt avfall samt hur dessa sprids i en cementmatris. Genomförandet av detta projekt motiveras av ett behov av studier under relevanta slutförvarsbetingelser och utgör ett komplement till de ofta accelererade laboratoriestudier som utgör en majoritet av det underlag som används inom säkerhetsanalysarbetet. Resultat från analys av prover från dessa experiment kan även utgöra underlag vid utformning av ytterligare kompletterande laboratorieexperiment.

Under 2019 och 2020 provtogs och analyserades stålbehållare innehållande grundvatten från förvaringsdjup, organiskt material representativt för låg- och medelaktivt avfall samt lite krossad cementpasta, för att skapa en för slutförvarsbetingelser representativ miljö. Utöver detta återtog och analyserades betongcylindrar med organiskt material, vilka förvarats i berggrunden under cirka 10 år. Analyserna

visade att nedbrytningen av organiskt material varit mycket begränsad och de enda nedbrytningsprodukterna, som med säkerhet kunde detekteras, utgjordes av mjukgörare från plasthanskar (Szabó et al. 2020).

Program

SKB:s program för studier av nedbrytning av organiskt material i cementmiljö under perioden fram till stängningen av Äspölaboratoriets undermarksdel:

- Återtag och analys av de kvarvarande två provkropparna innehållande organiskt material inom projekt Concrete and Clay i Äspölaboratoriet.

9.1.4 Påverkan från korrosion av metalliskt avfall

Vid korrosion av metaller ingjutna i ett cementbaserat material kan korrosionsprodukterna reagera med cementmineralerna och därigenom förändra egenskaperna hos de cementbaserade materialen. Utöver detta kan även det mekaniska tryck som uppstår om voluminösa korrosionsprodukter ansamlas på eller kring metallerna, medföra sprickbildning i ingjutningsmaterialet.

Nuläge

Under 2020 genomfördes inom projekt Concrete and Clay återtag och analys av en betongcylinder innehållande olika metallprover motsvarande de som tidigare rapporterats av Kalinowski (2015, 2021).

I överensstämmelse med resultaten från det föregående återtaget (Kalinowski 2015), visade även dessa analyser att korrosionshastigheten för samtliga i experimentet ingående metaller var mycket låg. Av särskilt intresse var här, att de långsiktiga korrosionshastigheter som uppmättes för aluminium och zink vida understeg det värde om 1 mm/år som använts i tidigare analyser av säkerhet efter förslutning för SFR. Kalinowski (2021) ger här stöd för att korrosionshastigheten för aluminium understiger 0,1 mm/år, men sannolikt är den dock betydligt lägre än så, då korrosionen tydligt avstannat mellan första och andra återtaget.

För denna slutsats kan stöd även hämtas från den studie som SKB genomfört i samarbete med forskare på KTH (Herting och Odnevall 2021) och som diskuteras i avsnitt 6.2. För både aluminium och zink visade studien en initialt mycket hög korrosionshastighet orsakad av reaktion mellan de studerade metallerna och den våta cementpastan. Korrosionsprocessen avstannade dock tydligt efter det att cementpastan härdat och den genomsnittliga korrosionshastigheten gick asymptotiskt mot mycket låga värden, i takt med att ett skikt med korrosionsprodukter byggdes på runt de ingjutna provkutsarna.

Det faktum att likartade resultat erhöles från långtidsexperiment under förvarsliga betingelser i Äspölaboratoriet som under kontrollerade betingelser i laboratoriemiljö, kan här tas som intäkt för att tidigare experiment tydligt överskattat korrosionshastigheten för dessa metaller, då de inte tagit hänsyn till långtidseffekter för ingjutet material. Detta visar att experiment utförda under förvarsliga betingelser och tidsskalor ger en mer fullständig bild av hur avfall bryts ner i SFR.

Program

SKB:s program för studier av metallkorrosion i cementmiljö under perioden fram till stängningen av Äspölaboratoriets undermarksdel:

- Återtag och analys av den kvarvarande provkroppen inom projekt Concrete and Clay innehållande metalliskt material samt slutrapportering av resultaten från denna experimentserie.

9.1.5 Bentonitens inverkan på cementbaserade material

I den befintliga silon i SFR och den föreslagna utformningen för bergssalen för historiskt avfall (BHA) i SFL, förekommer direktkontakt mellan betong och bentonit. När dessa material vattenmättats kan kemiska interaktioner leda till förändringar av cementmaterialens sammansättning, egenskaper och struktur. Nedbrytningsprodukter från avfallet kan komma att påverka förändringsprocesserna.

Nuläge

För cementkutsar bestående av vanlig cement, kunde ett lägre kalcium-kisel-förhållande noteras i gränssytan mot bentoniten samtidigt som något förhöjda halter av kalcium och magnesium noterades i bentoniten på ett avstånd av upp till 10 mm från gränssytan. För prover där kutsen bestod av låg-pH-cement var den påverkade zonen mindre och nivåerna lägre (Mårtensson och Kalinowski 2019).

Under 2021 återtog experimentpaketet Concrete and Clay 17 och 19 och analyser av dessa pågår. Fokus vid analyserna ligger, liksom vid föregående återtag, på studier av jontransport och mineralomvandlingar i gränssytorna mellan cement och bentonit samt spridning av nedbrytningsprodukter från de material som blandats in i de små cementkutsarna i bentoniten.

Program

SKB:s program för studier av bentonitens inverkan på cementbaserade material omfattar under perioden fram till stängningen av Äspölaboratoriets undermarksdel:

- Analys av proverna från experimentpaketet Concrete and Clay 17 och 19 samt rapportering av resultaten.
- Återtag, analys och rapportering av de två kvarvarande experimentpaketen inom projekt Concrete and Clay.

Med utgångspunkt i resultaten från projekt Concrete and Clay, planeras:

- Modelleringsstudier i syfte att verifiera modelleringsresultaten från tidigare genomförda studier av cement/bentonitinteraktioner.

9.1.6 Inverkan av förändrad bindemedelssammansättning och tillsatsmaterial

Vid tillverkning av cementbaserade material kan, förutom cement, vatten och ballast, även olika typer av tillsatsmaterial användas. Dessa material – exempelvis silika, finmald kalksten eller flygaska – kan tillsättas antingen vid cementtillverkningen eller vid tillredningen av det cementbaserade materialet. Syftet med tillsatserna kan vara att minska materialets miljöpåverkan såväl som att styra egenskaperna hos färskt och härdat material. Tillsatserna kan dock påverka materialets långsiktiga utveckling under perioden efter förslutning, då de leder till en förändrad mineralsammansättning jämfört med material utan dessa tillsatsmaterial.

Nuläge

SKB avslutade under den gångna Fud-perioden de experimentella undersökningarna av egenskaperna hos betong med olika sammansättning (Villar et al. 2019).

Modelleringsstudier genomförda av Idiart et al. (2019) visade att den långsiktiga kemiska lakningen av betong är tydligt beroende av betongens initiala porositet och transportegenskaper. Av de olika typer av betong som undersöktes i denna studie, uppvisade den betong som utvecklats för 2BMA (Lagerblad et al. 2017) de bästa egenskaperna. Det förklarades av dess mycket låga initiala porositet snarare än av dess kemiska sammansättning.

Program

- En känslighetsanalys planeras för att studera hur en förändrad sammansättning av bindemedel hos cementbaserade material påverkar materialets långsiktiga utveckling.

9.1.7 Långtidsutveckling av återfyllningsmaterial

I samband med förslutning av SFR kommer 1–2BMA, 1BRT samt 1–2BTF att återfyllas med krossat berg (makadam 16/32 mm). Detta material har en hög hydraulisk konduktivitet, vilket bidrar till att begränsa flödet av grundvatten genom avfallsdomänen och minska risken för att bergutfall skadar betongkonstruktionerna.

Nuläge

SKB har under den gångna Fud-perioden identifierat ett behov att förbättra kunskapsläget rörande långtidsutvecklingen i makadamåterfyllningen, då det råder viss osäkerhet i vilken utsträckning mikrobiell tillväxt på återfyllningens kornytor och i dess porer påverkar dess hydrauliska konduktivitet. De studier som genomförts av Anderson et al. (2006a, b) visade att biofilm utvecklas inom några månader på polerade bergytor som utsätts för anaerobt granitiskt grundvatten. Hur biofilmtillväxt sker under SFR-liknande förhållanden har däremot inte studerats.

För att förbättra förståelsen för de processer som kan ske i ett återfyllningsmaterial under slutförvarsbetingelser, har ett långtidsförsök under SFR-liknande förhållanden satts igång i Äspötunneln. Fyra behållare har installerats och anslutits till ett borrhål där vattnets sammansättning motsvarar det som kan förväntas i SFR under den inledande perioden efter förslutning och på motsvarande djup, det vill säga cirka 100 meter under havet, för att erhålla ett adekvat tryck på 0,5–1,2 MPa.

Det använda stenmaterialet motsvarar det som angivits som återfyllningsmaterial i 1–2BMA, 1–2BTF och 1BRT. Detta material utgörs av granitisk makadam med en storlek mellan 16–32 mm. Experimentet startades i november 2020. Två av behållarna bröts i slutet av 2021 och återfylldes därefter med nytt material och återinstallerades.

Program

SKB:s program för studier av återfyllningsmaterialets långtidsutveckling kommer att genomföras fram till stängningen av Äspölaboratoriets undermarksdel. Det kommer att ha fokus på mikrobiell tillväxt och ansamling av finkorniga sprickmineral:

- Analys av material från det återtag som genomfördes i slutet av 2021 med fokus på förekomst och tillväxt av bakteriellt material samt ansamling av sprickmineral.
- Fortsatt drift av de fyra experimentbehållarna.
- Brytning och analys av materialet i samtliga behållare.

9.2 Utformning av betongkonstruktioner och material till SFR

I detta avsnitt redovisas SKB:s program för utformning av betongkonstruktioner, materialutveckling och produktionsmetod för SFR.

9.2.1 Bergssal för medelaktivt avfall, 2BMA

Den planerade bergssalen för medelaktivt avfall (2BMA) i den utbyggda delen av SFR kommer att utgöras av en drygt 250 meter lång bergssal i vilken ett antal fristående kassuner uppförs i oarmerad betong.

Nuläge

SKB har under den gångna Fud-perioden fortsatt det teknikutvecklingsarbete som pågått sedan 2015, och fokuserat på utveckling av metod för att möjliggöra användning av formsteg vid uppförande av gjutform till kassunernas ytterväggar. Detta arbete tog sin utgångspunkt i den storskaliga provgjutningen av en kassun i fjärdedelsskala som genomfördes i Äspölaboratoriet under 2018 och 2019 (Mårtensson och Vogt 2020) (figur 9-1).

Det fanns ett krav på att kassunens ytterväggar skulle uppföras utan användning av formsteg för att hålla samman formen under gjutningen, för att därigenom undvika uppkomst av hydrauliskt genomsläppliga zoner. Dock insågs under arbetets genomförande, att användning av formsteg väsentligt skulle underlätta formbygget och ett arbete för att identifiera olika handlingsalternativ inleddes därför.

Den genomförda studien (Mårtensson 2021a) visade att användning av skyddsror av betong runt formstegen i samband med gjutning dels kunde säkerställa att formstegen kunde avlägsnas i samband med formrivning, dels att dessa effektivt kunde fyllas med ett cementbaserat bruk på ett sådant sätt att en struktur med mycket låg hydraulisk konduktivitet kunde erhållas.



Figur 9-1. Gjuten kassun i Äspölaboratoriet, ut- och insida (Mårtensson och Vogt 2020).

Mätningar visade att den hydrauliska konduktiviteten för de fyllda och ingjutna rören motsvarande den för betongen i kassunens yttervägg. Figur 9-2 visar tvärsnitt av en borrkärna från den vägg som uppfördes som en del i detta utvärderingsarbete.

SKB har under den gångna Fud-perioden även låtit genomföra ett antal utredningar rörande metod för uppförande av kassunernas innerväggar. Det hittills genomförda arbetet har varit av övergripande utvärderingskaraktär och omfattat utvärdering av tre olika metoder för uppförande av innerväggar:

- Inplacering och sammangjutning av prefabricerade betongelement.
- Glidformsgjutning.
- Traditionell gjutning med fast form.

Utredningarna har visat att samtliga metoder är förenade med olika för- och nackdelar och något slutligt val av metod har ännu inte gjorts.

Program

SKB:s program för utveckling av kassunerna och för att fastställa produktionsmetoden för 2BMA inför start av byggnation under mark:

- Utveckling av metod för uppförande av kassunernas innerväggar.
- Verifierande tester av konstruktions- och produktionsteknik.
- Framtagning av drift- och underhållsprogram.



Figur 9-2. Tvärsnitt av en borrkärna från test av olika koncept för möjliggörande av användning av formsteg vid uppförande av form till ytterväggar till kassunerna i 2BMA (Mårtensson 2021a).

9.2.2 Utformning av system för gastransport

Under perioden efter förslutning kommer avfall, avfallsbehållare och eventuell armering att brytas ner med förväntad gasbildning som följd. Även om en viss gastransport kan ske genom betongens porsystem, behöver ett system för gastransport installeras för att underlätta passagen genom betongkonstruktioner som har låg gasgenomsläpplighet.

Nuläge

System för gastransport planeras idag att installeras i silo och 2BMA (Mårtensson et al. 2022). Det pågår även utredningar rörande inverkan av ett system för gastransport i 1BMA avseende förvarets säkerhet efter förslutning. Utredningarna påkallas av planerna att uppföra nya och tätare väggar utanför den nuvarande betongkonstruktionen samt att öka tjockleken på det lock som kommer att uppföras i samband med förslutning, något som kommer att minska betongkonstruktionens gasgenomsläpplighet betydligt.

Gällande koncept för system för gastransport innebär att hål görs i betongkonstruktionens lock som fylls med ett gasgenomsläppligt material i kombination med gasledande kanaler i avfallsdomänen. Dessa kanaler kan antingen lämnas tomma eller fyllas med ett genomsläppligt bruk. Systemet för gastransport är utformat på ett sådant sätt att betongkonstruktionens strukturella integritet inte påverkas.

Program

- Fortsätta utredningar rörande utformning av gasavledningssystemet i 2BMA. Se även avsnitt 9.1.2.
- Experimentella studier rörande transportegenskaper hos olika typer av material aktuella för användning i gasavledningssystem.
- Utveckling av ett gasavledningssystem i 1BMA.

9.2.3 Betongtankars hållfasthetsegenskaper

I 1–2BTF deponeras huvudsakligen betongtankar med avvattnad jonbytomassa. I analysen av säkerhet efter förslutning ansätts dessa betongtankar ett visst flödesmotstånd, vilket förutsätter att sprickbildning inte sker under den inledande perioden efter förslutning.

Nuläge

SKB genomförde under 2021 en undersökning av i vilken omfattning vatten kan tränga in genom väggar och botten på en betongtank. Studien (Mårtensson 2021b) visade att betongtankens väggar och botten var mycket vattentäta och inget vatten trängde in i tanken under de sex månader som försöket pågick. Givet det faktum att anläggningsytan mellan betongtankens lock och själva tanken tätas med en kombination av olika material var studiens slutsats att betongtanken som sådan kommer att vara så vattentät att den inte kan förväntas återfyllas under återmättnadsfasen efter förslutning. Betongtankarna förväntas därmed utsättas för ett ensidigt vattentryck motsvarande trycket på förvarsdjup först i samband med att förvaret blir helt återmättat.

Kompletterande strukturmekaniska studier (Könönen och Malm 2021) visade dock att betongtankarna inte är dimensionerade för detta vattentryck, varför sprickbildning kan förväntas ske i slutet av återmättnadsfasen, om inte åtgärder genomförs för att säkerställa en snabbare återfyllning av betongtankarna.

Program

- Experimentell undersökning av betongtankars hållfasthet gentemot ett ensidigt vattentryck.
- Utökade strukturmekaniska beräkningar av betongtank som utsätts för höga tryck.
- Utveckling av en kopplad modell som löser det strukturmekaniska problemet och flödet genom tankväggen samtidigt.

9.2.4 Reparation och förstärkning av betongkonstruktionen i 1BMA

SKB har under ett flertal år genomfört undersökningar och utredningar kopplade till nuvarande status och metod för reparation och förstärkning av betongkonstruktionen i 1BMA. Baserat på dessa utredningar har SKB beslutat att förse betongkonstruktionen med nya väggar utanför de existerande samt att öka tjockleken på betongkonstruktionens lock. Båda dessa åtgärder avses att genomföras i samband med förslutning av anläggningen.

Nuläge

SKB har tidigare visat att genom de planerade åtgärderna går det att säkerställa att förvarets tänkta initialtillstånd kan uppnås. Utöver detta har SKB även visat att nya väggar och locket kan dimensioneras för att stå emot både det ensidiga vattentrycket som skulle kunna uppkomma i samband med förvarets återmättnad och jordtrycket från återfyllningsmaterialet,, under åtminstone upp till 20 000 år efter förslutning (Mårtensson 2017).

SKB genomförde under den gångna Fud-perioden studier rörande hållfastheten hos väggarna i betongkonstruktionen i 1BMA gentemot inre och yttre laster (Eriksson 2021). Studierna visade att väggarna på den befintliga betongkonstruktionen inte har kapaciteten att motstå last från svällande avfall.

Under 2021 lät SKB genomföra utredningar kopplade till kostnader för reparation och förstärkning av betongkonstruktionen (Wimelius 2021) samt beräkning av dosbelastning till personal (Becker 2021). Utredningarna visade att varken kostnader eller dosbelastning till personal i samband med detta arbete skulle vara sådana att de tydligt talar mot en reparation enligt den avsedda metodiken.

Program

- Fördjupad analys av i vilken omfattning laster orsakade av svällande avfall kan påverka befintlig och ny betongkonstruktion.
- Uppdatering av metod för reparation och förstärkning med utgångspunkt i genomfört analysarbete.

9.3 Utformning av betongkonstruktioner och material till Kärnbränsleförvaret

9.3.1 Plugg till deponeringstunnlar

Pluggar till deponeringstunnlar i Kärnbränsleförvaret håller återfyllningsmaterialet i deponeringstunnlarna på plats och begränsar transport av gas och vatten mellan deponeringstunnlar och angränsande delar under perioden fram till förslutning av anläggningen. Pluggarna har inte någon funktion efter förslutning.

Nuläge

Det fullskaliga pluggförsöket Domplu slutrapporterades av Enzell och Malm (2019). Försöket visade att det är möjligt att uppföra pluggsystemet på ett ändamålsenligt sätt med en oarmerad betongplugg av låg-pH-betong som uppfyller funktionskraven (Recept B200 utvecklat av Vogt et al. 2009).

Efter rivning och slututvärdering av Domplu (Enzell och Malm 2019) har inget ytterligare praktiskt arbete genomförts inom detta teknikutvecklingsområde.

Program

- Specificering av krav och konstruktionsförutsättningar för pluggen till deponeringstunnlarna.
- Uppdatering av pluggens utformning med utgångspunkt i den senaste inriktningen på tunneltvärsnitt för deponeringstunnlarna.

9.3.2 Låg-pH-cementmaterial för injektering och bergförstärkning

Dagens konstruktionsförutsättningar och krav på Kärnbränsleförvaret förutsätter användning av låg-pH-cementmaterial vid injektering och bergförstärkning mellan 200 meter under markytan och förvarsnivån. Detta grundar sig huvudsakligen på en studie av spridning av en plym av lakningsprodukter i berget från injektering av ramp och schakt (Sidborn et al. 2014), i vilken risken för påverkan av buffertens egenskaper noterades.

Nuläge

SKB har under den gångna Fud-perioden inte genomfört något utvecklingsarbete rörande låg-pH cementbaserade material för injektering och bergförstärkning. För cementbaserade material av standardtyp, vilka alltså inte innehåller pH-sänkande tillsatsmaterial, befinner sig det analysarbete rörande pH-plymens utbredning i Kärnbränsleförvaret som påbörjades under den gångna Fud-perioden, i sitt avslutande skede. De nya analyserna har, utöver cementbaserade injekteringsmaterial, även inkluderat sprutbetong och bruk till bergbultar. Studierna baseras på mer realistiska antaganden och beräkningsförutsättningar än de som användes i studien som genomfördes av Sidborn et al. (2014), och inkluderar även analys av vissa osäkerheter. Resultaten har inte analyserats fullständigt ännu, men förväntas kunna ge ytterligare underlag med mer realistiska antaganden inför kravformulering.

De möjliga effekterna av pH-plymen på radionuklidtransport kommer också att analyseras (avsnitt 11.4.3).

Program

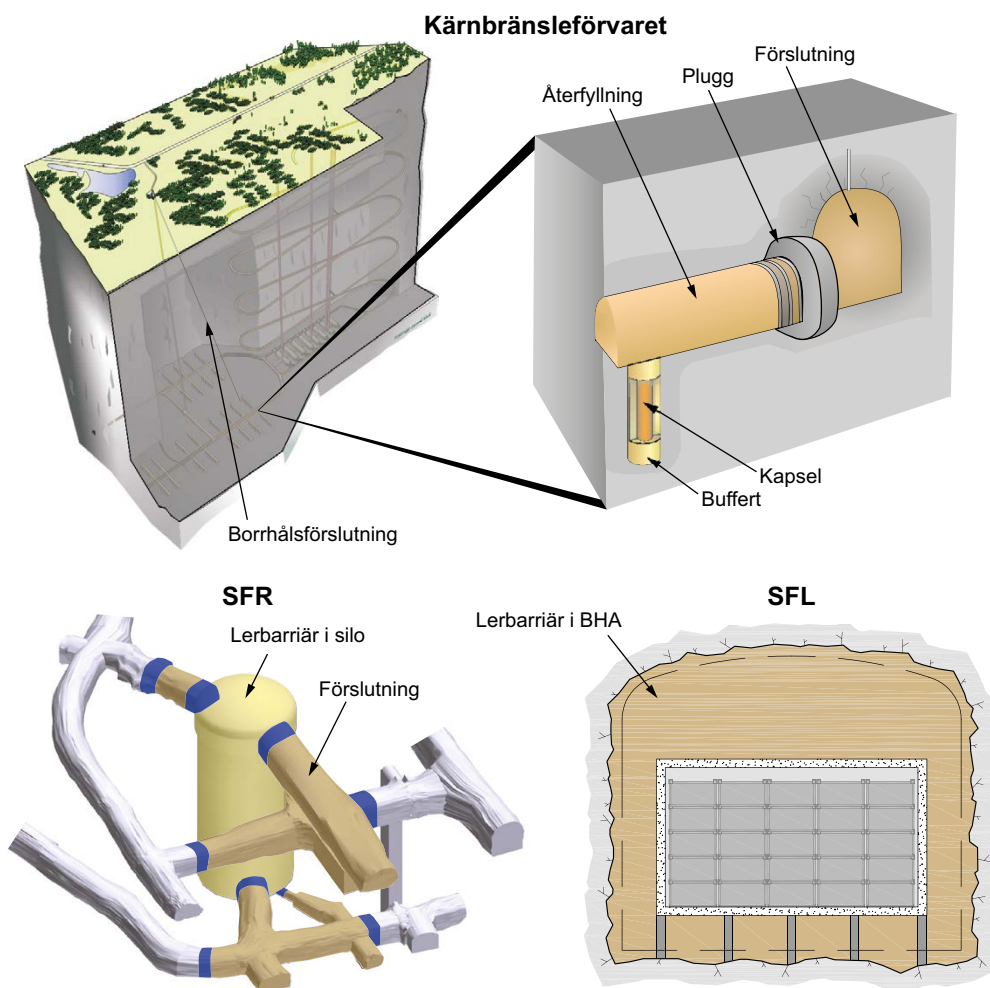
- Revidering av kraven rörande maximalt djup för användning av cementbaserade material av standardtyp (alltså utan pH-sänkande tillsatsmaterial) för injektering, bergförstärkning och bruk till bergbultar. Detta kommer att ske när den pågående analysen rörande pH-plymens utbredning vid användning av cementbaserade material av standardtyp för injektering och bergförstärkning är fullt genomförd.

10 Lerbarriärer, pluggar och förslutning

Lerbarriärernas huvudfunktion är att begränsa vattenflödet runt kapseln och i deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret, runt avfallsbehållare och i förslutning i silon i SFR och i BHA i SFL (figur 10-1) samt att begränsa den advektiva transporten i deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret. Detta åstadkoms genom att leran har låg hydraulisk konduktivitet, vilket medför att diffusion blir den dominerande transportmekanismen, samt genom ett svälltryck som leder till att lerbarriären blir självläkande. I Kärnbränsleförvaret ska bufferten också hålla kapseln på plats i deponeringshålet, dämpa bergets skjuvrörelser och bibehålla sina egenskaper under den tidsperiod som analyseras. Bufferten ska dessutom begränsa den mikrobiella aktiviteten på kapselns yta och filtrera kolloidala partiklar. En viktig funktion hos återfyllningen i Kärnbränsleförvarets deponeringstunnlar är också att hålla bufferten på plats i deponeringshålet. Lerbarriärerna får inte signifikant försämra övriga barriärers funktion.

Förslutningen utgörs av pluggar, material installerat i borrhål samt det material som installeras i alla bergutrymmen utanför förvarsutrymmena (bergssalarna i SFR och SFL samt deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret) för att försluta dem.

Förslutningen i förvaren ska upprätthålla flerbarriärprincipen, genom att hindra att det bildas konduktiva vattenvägar mellan förvarsområdet och markytan samt hindra att återfyllningen expanderar ut ur deponeringstunnlarna respektive bergssalarna. I den övre delen av ramp och schakt ska förslutningen avsevärt försvåra oavsiktligt intrång i förvaret.



Figur 10-1. Övre: Lerbarriärerna och förslutning i Kärnbränsleförvaret: buffert, återfyllning, förslutning och borrhålsförslutning. Nedre, vänster: silons lerbarriär och förslutning i SFR. Nedre, höger: lerbarriär i bergssal för historiskt avfall (BHA) i SFL.

10.1 Bentonitmaterialets utveckling efter installation fram till mättnad

I både Kärnbränsleförvaret och bergssalen för historiskt avfall i SFL (BHA) kommer lerbarriärerna att installeras som en kombination av kompakterade block och pellets tillverkade av bentonit. Den installerade barriären har därför initialt varken ett svälltryck eller en låg hydraulisk konduktivitet. Dessa egenskaper kommer att utvecklas i och med att bentoniten tar upp vatten från det omgivande berget.

För att mer utförligt kunna förstå och beskriva bentonitmaterialets utveckling fram till mättnad behövs insatser kring den kemiska utvecklingen under den omättade perioden, kanalbildning/erosion, svällning, homogenisering av block, pellets och hålrum, ångcirkulation samt kring mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden.

10.1.1 Gasfasens sammansättning under den omättade perioden

I berget i Forsmark förväntas mättnadstiden för bufferten kring kapseln i Kärnbränsleförvaret att variera från några tiotals till några tusen år, beroende på deponeringshålets position i berget. I de flesta positioner förväntas mättnadstiden vara mer än 1 000 år. Detta innebär att kapselytan kan utsättas för omättat tillstånd under relativt lång tid. Ett möjligt problem för kapselkorrosion är gasens kemiska sammansättning i den omättade bentoniten. Av särskilt intresse är syrenehållet (O_2) och vätesulfiden (H_2S). Frågorna som behöver besvaras är:

- Kommer syrgas att konsumeras av förvarskomponenterna? Om ja, vilken är reaktionshastigheten?
- Kommer vätesulfid att genereras från mineral i bufferten?
- Kan vätesulfid genereras mikrobiellt i en omättad buffert?
- Kan det bildas andra gaser?

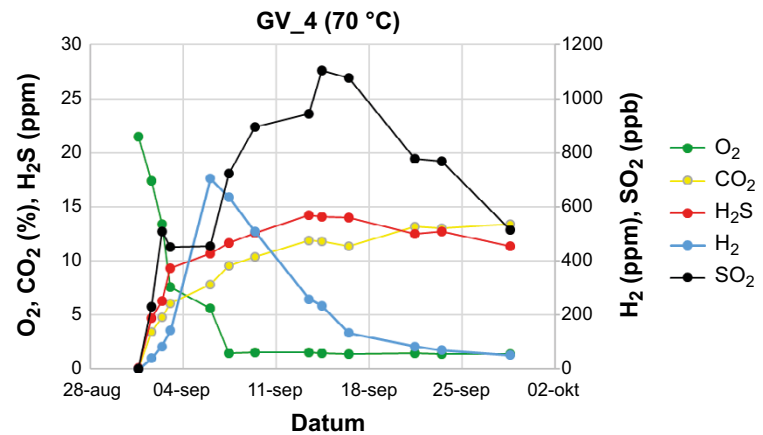
Dessa frågor är av särskilt intresse för Kärnbränsleförvaret, eftersom gassammansättningen framför allt kan påverka kopparkapseln. Det är dock inte omöjligt att sammansättningen av gasfasen under den omättade perioden också kan vara av intresse för BHA i SFL.

Nuläge

Laboratorieförsök i vilka gassammansättningens utveckling i vattenomättad bentonit studeras har presenterats av Birgersson och Goudarzi (2018), Åkesson et al. (2020) och Åkesson och Laitinen (2022). Metodiken i dessa försök har successivt utvecklats. Inledningsvis studerades en ganska komplex försöksuppställning med termisk gradient och med en kopparvärmare omgiven av bentonitblock och pellets, samtidigt som enbart syrgashalten analyserades med jämna mellanrum. Under 2021 har istället försöken fokuserats på en testutrustning med isoterma förhållanden i vilken bentonit placeras i ett glaskärl (utan koppar) och där fem olika gaskomponenter kan analyseras regelbundet (O_2 , CO_2 , H_2 , H_2S och SO_2) (figur 10-2). Denna utrustning finns i materialforskningslaboratoriet på Äspö. Efter de inledande mätningarna med kopparvärmare gjordes tolkningen att syrgas i huvudsak förbrukas genom aerob kopparkorrosion. De nya mätningarna visar å andra sidan tydligt att syrgas mycket väl kan förbrukas i bentonit och att detta tycks ske genom oxidation av pyrit.

Program

- Fortsatta undersökningar rörande gassammansättningens utveckling. Detta arbete kommer framför allt att innefatta undersökningar av hur processerna påverkas av olika förhållanden, till exempel gällande temperatur och vattenkvot.



Figur 10-2. Testutrustning med glaskärl i värmeskåp (vänster). Gassammansättningens utveckling vid uppvärmning av en Milosbentonit med vattenkvot ~17 % och temperatur 70 °C (höger). Från Åkesson och Laitinen (2022).

10.1.2 Kanalbildning/erosion

Ett hydrauliskt problem under driftskedet rör kanalbildning och tillhörande erosionseffekter i bufferten och återfyllningen. Det vatteninflöde till deponeringshålen som krävs för bevätning av bufferten kommer huvudsakligen att ske genom sprickor i omgivande berg. Om inflödet är koncentrerat till sprickor som tillför vatten i en snabbare takt än den som den svällande bufferten kan absorbera, uppkommer ett vattentryck i sprickan som påverkar bufferten. Eftersom den svällande bentoniten inledningsvis är en gel, med en densitet som ökar med tiden när vatten tas upp i bentoniten, kan gelen vara alltför mjuk för att stoppa vatteninflödet. Resultatet kan bli kanalbildning i bentoniten och ett kontinuerligt vattenflöde samt fortlöpande erosion av bentonitpartiklar. Det fortsatta förloppet bestäms då av bentonitens svällningshastighet, flödeshastigheten genom bufferten och buffertens erosionshastighet.

Samma fenomen kan uppkomma i återfyllningen i BHA i SFL. I det förvaret är dock bentonitmängden så stor att en massförlust i det tidiga skedet knappast kommer att ha någon betydelse för barriärens funktion.

Nuläge

Studier rörande bland annat erosion, självläkning av erosionskanaler, kanalbildning och förmåga att stoppa kanalbildning utfördes inom det så kallade EVA-projektet (Börgesson et al. 2015). Målet med detta projekt var att förstå och utveckla modeller för kritiska processer som uppstår i ett tidigt skede efter installationen av buffert och kapsel och att skapa förutsättningar för att ställa krav på täthet hos ändpluggarna i deponeringstunnlarna. Resultaten från dessa studier ledde bland annat fram till följande iakttagelser:

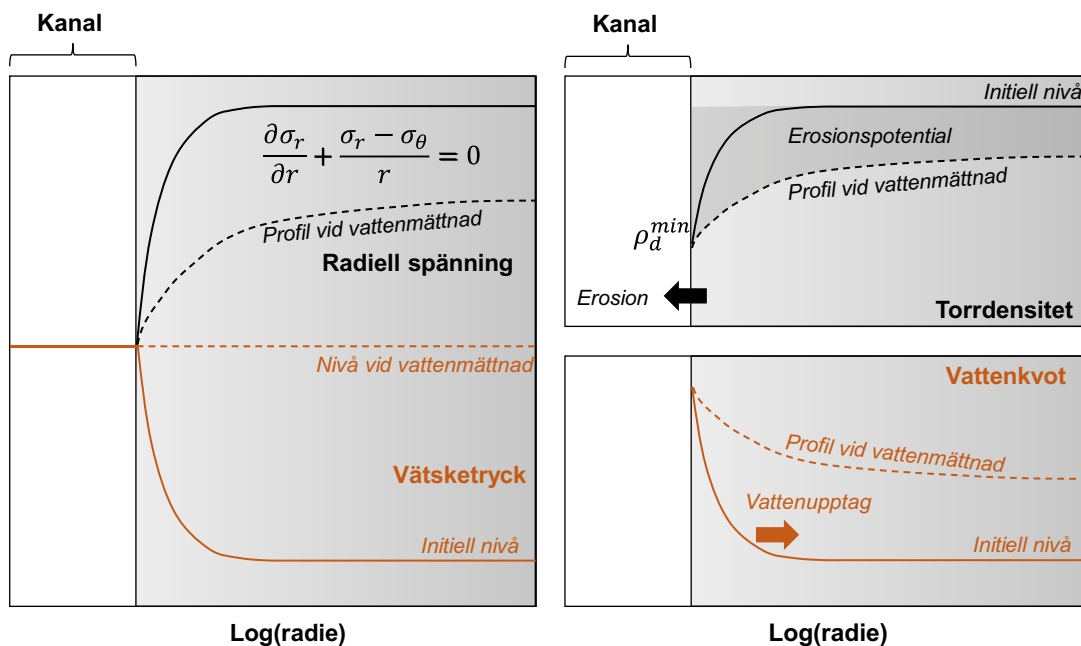
- Kanalbildning med påföljande erosion uppstår och upprätthålls tills vattentrycksgradienten tas av pluggen (det vill säga då hydrostatiskt tryck råder bakom pluggen) och flödeshastigheten ut från återfyllningen är lägre än 10^{-4} L/min. Detta innebär att kanalbildning/erosion kan fortgå under hela pluggens livstid, det vill säga så länge nedströms liggande stamtunnel hålls öppen.
- Erosionskanaler med begränsad radiell utsträckning (1–2 cm) kommer att självläka i sådan omfattning att de inte har ett avgörande inflytande på de hydrauliska egenskaperna hos bentoniten när stagnanta vattentrycksförhållanden uppnåtts.

Program

- Erosionsmätningar vid realistiska testförhållanden. Detta arbete syftar till att kvantifiera den potentiella omfördelningen av bentonit från deponeringshål till tunnel och planeras att innefatta erosionstester (exempelvis i skala ~1:10) i vilka både buffert och återfyllning representeras.
- Utveckling av konceptuell modell (figur 10-3). Arbetet syftar till att öka förståelsen för dessa komplexa processer och innefattar såväl modellering som olika laboratorietester.

10.1.3 Vattenupptag

När bentonitblocken och pelletsfyllningen installerats i deponeringshål och deponeringstunnlar i Kärnbränsleförvaret, eller i återfyllningen i BHA i SFL, kommer bentoniten att ta upp vatten från det omgivande berget. Under mätnadsfasen kommer bentoniten att utveckla ett svälltryck som påverkar berget och omgivande barriärer mekaniskt. Vattentransporten i den omättade bentoniten är en komplicerad process, som bland annat är beroende av temperatur, densitet, montmorillonithalt och vattenkvot i barriärens olika delar. Den viktigaste drivkraften för att nå vattenmättnad är lervattnets låga kemiska potential (vilket kan uttryckas som ett negativt vätsketryck eller suction), vilket leder till att vatten tas upp från berget. De hydrauliska förhållandena i berget närmast barriären avgör mätnadsförloppets utveckling. Om tillgången till vatten är obegränsad, nås full vattenmättnad inom ett antal år i bufferten i Kärnbränsleförvaret och på några tiotals år i återfyllningen i deponeringstunnlarna och i BHA. I och med att vattentillgången kommer att vara begränsad av flödet i berget kommer vattenmättnaden i realiteten att ta mycket längre tid.



Figur 10-3. Schematisk illustration av konceptuell modell för kanalbildning/erosion. Den radiella spänningsfördelningen utmärks av mekanisk jämvikt och att denna spänning vid randen är densamma som portrycket i kanalen (övre vänster). Portrycket i kanalen definierar också randvillkoren för vätsketrycksfördelningen (nedre vänster). Torrdensitetsfördelning är starkt relaterad till spänningsfördelning, i synnerhet i vattenmättade delar, och utgår ifrån att det finns en minimidensitet för vilket svälltrycket är noll (övre höger). Vattenkvotsfördelningen är starkt relaterad till torrdensiteten (mättade delar) och vätsketrycket (omättade delar). Differensen mellan initial densitet och densitetsprofilen vid vattenmättnad utgör en potential för erosionens maximala omfattning. Tidskalan för vattenupptaget bestämmer också tiden det tar för att uppnå den maximala erosionen.

Vattenupptaget och tiden för full vattenmättnad har i sig ingen direkt betydelse för barriärens funktion i något av förvaren. Processen kan dock ha indirekt betydelse för förvarets funktion, till exempel genom

- den maximala temperaturen, då en mättad buffert har högre värmeledningsförmåga,
- svällnings- och homogeniseringsprocessen,
- tiden för när specier (till exempel korroderande ämnen) i vattenlösning kan transporteras mellan berg och kapsel,
- tiden för hur länge en gasfas kan finnas i kontakt med kapseln.

Vattenmättnadsprocessen ger därför randvillkor till en rad andra processer.

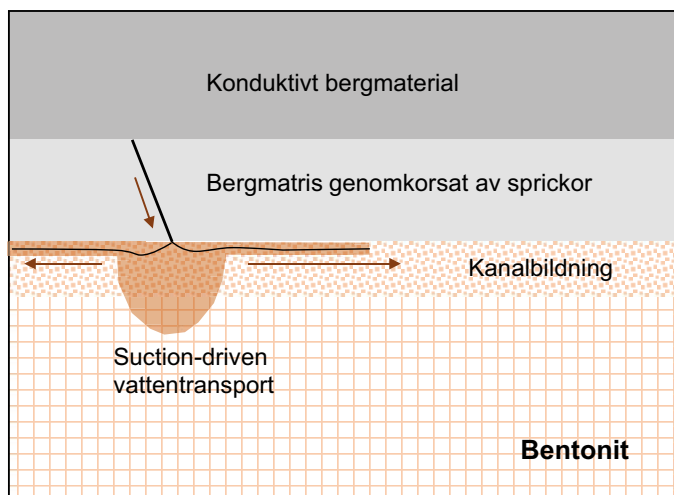
Nuläge

Vattenmättnadsprediktioner för buffert och återfyllningen utfördes i samband med SR-Site (Åkesson et al. 2010). Genom att kombinera dessa modeller med sprickdata från en hydrogeologisk modell över förvarsplatsen i Forsmark, kunde en beskrivning av vattenmättnadstidens fördelning för de olika deponeringshålen tas fram (Sellin et al. 2017).

Efter detta har vattenupptaget i olika experiment modellerats, dels för olika fältförsök (Prototypförvaret (Svemar et al. 2016), BRIE (Malmberg och Åkesson 2018) och Domplu (Åkesson et al. 2019)), dels för laboratorieförsök där vattentransport i pelletsfyllda spalter har undersökts (Åkesson 2020, Eriksson 2019, 2020). Dessa arbeten har uppmärksammat behovet av att utveckla den konceptuella beskrivning och de modelleringsverktyg som används för vattenupptagsprediktioner, dels beträffande bergets hydrauliska egenskaper, dels för att kunna representera kanalbildning i bentoniten (figur 10-4).

Program

- Inverkan av bergets spricknätverk på vattenupptag. Detta arbete syftar till att förbättra vattenupptagsprediktioner genom att inkludera en mer realistisk beskrivning av bergets hydrauliska egenskaper och innefattar i första hand modellering.
- Vattentransport genom kanalbildning. Detta arbete syftar till att förbättra vattenupptagsprediktioner genom att inkludera en representation av kanalbildning i materialmodellerna för buffert och återfyllning. Det innefattar bland annat skalförsök av en tunnelsektion med lokalt inflöde, för att på så sätt undersöka förekomsten av kanalbildning och i vilken omfattning detta bidrar till ett påskyndat vattenupptag.
- Vattenupptagsmodelleringar inom Task Force EBS och i samband med utvärderingen av Prototypförvaret. Dessa arbeten syftar till att utveckla och validera de modelleringsverktyg som används för vattenupptagsprediktioner genom att tillämpa verktygen på olika experiment, vilka kan variera från småskaliga laboratorieexperiment till stora fullskaleexperiment som Prototypförvaret.
- Laboratiemätningar av retentionskurvor för olika bentoniter.
- Komplettering/revidering av vattenupptagsprediktioner för Kärnbränsleförvaret. Detta arbete ska utmynna i en uppdaterad beskrivning av vattenmättnadstidens fördelning för de olika deponeringshålen. Arbetet utförs troligtvis inte under Fud-perioden.
- Komplettering/revidering av vattenupptagsprediktioner för SFL. Detta arbete ska utmynna i en uppdaterad beskrivning av vattenmättnadstiden för återfyllningen i BHA.



Figur 10-4. Schematisk illustration av konceptuell beskrivning av vattenupptag i bentonit vid lokalt inflöde från berg. Berget hanteras som ett konduktivt homogent material, förutom i en begränsad cylinder runt deponeringshålen, i vilken berget representeras med en lågkonduktiv bergmatris som genomkorsas av sprickor. Vattenupptaget i bentoniten utmärks av en "suction-driven" vattentransport och av en snabb kanalbildning, framför allt längs bergväggen.

10.1.4 Svällning, homogenisering av block, pellets och hålrum

Bufferten i Kärnbränsleförvaret kommer att installeras som en kombination av block med hög initial densitet och en pelletsfyllning med avsevärt lägre densitet. I nuvarande referensutformning gäller detta också för återfyllningen i deponeringstunnlarna i Kärnbränsleförvaret samt i BHA i SFL. Under vattenupptaget kommer komponenterna att svälla, vilket medför att hålrum fylls och att densitetskillnaderna utjämnas. Svällningen kommer också att medföra att eventuella förluster av material, orsakade av till exempel kanalbildning (avsnitt 10.1.2) eller kolloidfrigörelse (avsnitt 10.3.3), kan självläka. I Kärnbränsleförvaret kommer svällningen av bufferten att leda till att den kan expandera in i tunnelåterfyllningen, vilket i sin tur skulle kunna leda till att densiteten i deponeringshålet sjunker.

En tillräcklig densitet hos det vattenmättade materialet i lerbarriärerna är avgörande för att säkerhetsfunktionerna ska vara uppfyllda. Detta förutsätter också att materialet är tillräckligt homogent. Svällningen leder till homogenisering, men sluttillståndet kommer alltid att ha en kvarstående heterogenitet. Graden av kvarstående heterogenitet har studerats i både laboratorieförsök och fältförsök, men processen är starkt kopplad både till initialtillstånd och randvillkor, vilket gör att experimentella observationer bara är representativa för de förhållanden under vilka försöket har genomförts. Det är därför nödvändigt att ha numeriska modeller som kan simulera buffertens mekaniska utveckling med tillräcklig precision.

Frågeställningar som behöver belysas:

- Kommer lerbarriärerna, installerade enligt referensutformningen att homogeniseras tillräckligt för att säkerhetsfunktionerna ska uppfyllas? Om inte, kan utformningen förbättras, eller måste fallet med en heterogen barriär hanteras i säkerhetsanalysen?
- Kan barriärerna självläka i tillräcklig omfattning för att säkerhetsfunktionerna ska vara uppfyllda även efter en massförlust till följd av erosion?
- Vilka krav måste ställas på återfyllningens mekaniska egenskaper för att den ska kunna begränsa uppsvällningen av bufferten ur deponeringshålet?

Ett annat krav på bufferten är att den ska hålla kapseln på plats så att den inte sjunker till botten av deponeringshålet. I en vattenmättad buffert kommer svälltrycket tillsammans med friktionen mellan kapsel och buffert att hålla kapseln på plats. I en omättad buffert är det istället mekaniska egenskaper som ska förhindra att kapseln sjunker. Detta är troligtvis inget problem, men processen har inte studerats.

Nuläge

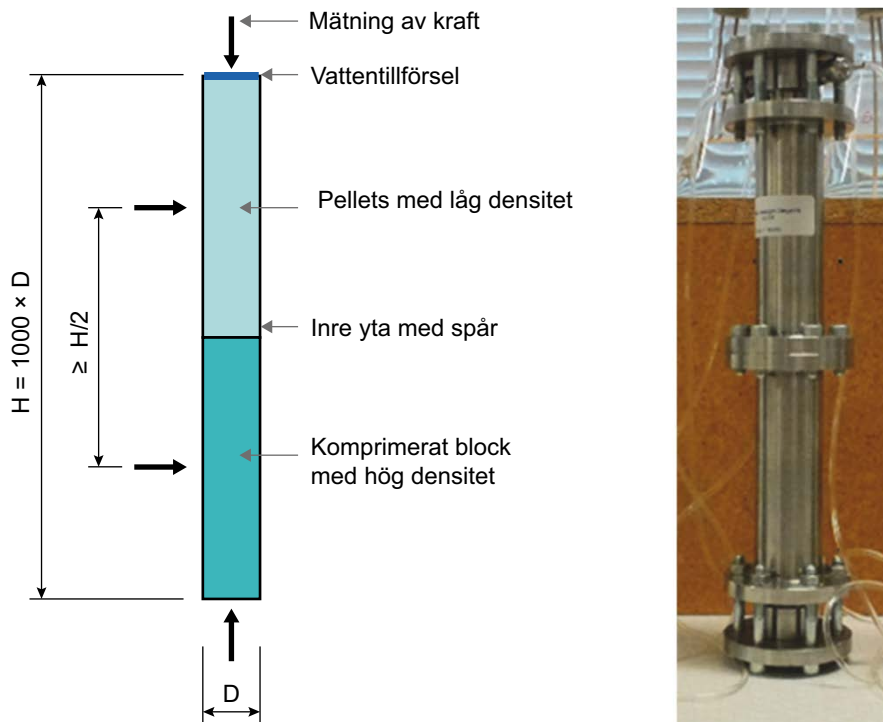
SKB har koordinerat EU-projektet Beacon som avslutades i maj 2022. Målet med projektet var att ta fram, verifiera och validera kvantitativa modeller som kan simulera den mekaniska utvecklingen hos bentonitbarriärer. Vid start av projektet fanns det bara ett fåtal grupper som hade erfarenhet av den typen av uppgifter. Efter projektet finns det ett 10-tal grupper som kan hantera frågan. Slutsatsen från projektet är att det finns verktyg tillgängliga som kan prediktera den kvarvarande heterogeniteten i en installerad barriär med relativt god precision. Resultaten från Beacon finns tillgängliga på <https://www.beacon-h2020.eu/>, och en del resultat finns också publicerade på andra ställen (Bosch et al. 2020a, b, Narkuniene et al. 2021, Sellin et al. 2020, Gens et al. 2018, Sun et al. 2019, Villar et al. 2021, Ferrari et al. 2022).

Parallellt med arbetet i Beacon har SKB fortsatt med modellutveckling och experiment i egen regi. En hydro-mekanisk materialmodell, kallad HBM, som utvecklats för bentonitlera, har implementerats i den generella finita element-lösaren Comsol Multiphysics. Den nuvarande HBM-modellen har visat sig ha god förmåga att representera leran, då den har kunnat användas under vitt skilda situationer utan att materialparametrar har behövt kalibreras om, och den har framgångsrikt använts inom Beacon-projektet.

I Dueck och Börgesson (2021) presenteras tre experimentella studier där syftena har varit att jämföra homogenisering hos kalcium- och natriumbentonit, homogenisering vid snabb och långsam bevätning, och homogenisering i långa rör (figur 10-5) efter två, fyra och sex år. I Dueck et al. (2022) avrapporteras delresultat från pågående experimentella försök. Försöken behandlar svälltryck och densitet i expansions-tester i cylindrar, självläkningsförsök där avsikten är att studera konsekvenser av massförluster, och homogenisering i långa rör där fokus är på väggfriktion.

Svällning och homogenisering under förhållanden när det tomma utrymmet i försöket är stort jämfört med den ursprungliga volymen lera finns presenterat i Harrington et al. (2020). I Daniels et al. (2021) utvärderas effekten av en förhöjd temperatur på homogeniseringen.

För att utöka kunskapen kring hur olika parametrar kan påverka friktionen mellan deponeringshålsväggen och bufferten så har modellering påbörjats. Den utreder hur buffertuppsvällningen påverkas av bland annat inflödets läge, initial torrdensitet och styvhet på återfyllning. Beräkningarna görs med flera olika modeller för att kunna uppskatta osäkerheter i modellerna.



Figur 10-5. Ritning och foto på försöksuppsättningen med långa rör. Axiellt och radiellt tryck mäts vid pilarna (Dueck och Börgesson 2021).

Program

- Utvecklingen och testningen av HBM-modellen i Comsol Multiphysics kommer att fortsätta. Syftet är att ha tillgång till ett modernt beräkningsverktyg vid kommande säkerhetsanalyser och teknikutveckling.
- Laboratorie- och modellstudier av svällning och homogenisering kommer att fortsätta. Fokus kommer att ligga på drift och brytning av pågående långtidsförsök samt att ta fram data för de parametrar där osäkerheterna fortfarande är stora.
- Formulering av krav på återfyllningens förmåga att motverka buffertuppsvällning, baserat på de kunskaper som har erhållits från modelleringar gällande buffertuppsvällning. Dessa krav kommer att formuleras som ett styvhetskrav på återfyllningen.
- Laboratieförsök för att studera kryp i omättad bentonit.

I samband med brytningen av Prototypförvaret (avsnitt 4.10.1) kommer

- prediktiv förmodellering när det gäller buffertens och återfyllningens homogenisering att genomföras,
- homogeniseringen av pellets och block i bufferten och i det in situ-kompakterade återfyllningsmaterialet att studeras,
- uppsvällningen av buffertmaterial in i återfyllningen att mätas.

10.1.5 Ångcirkulation

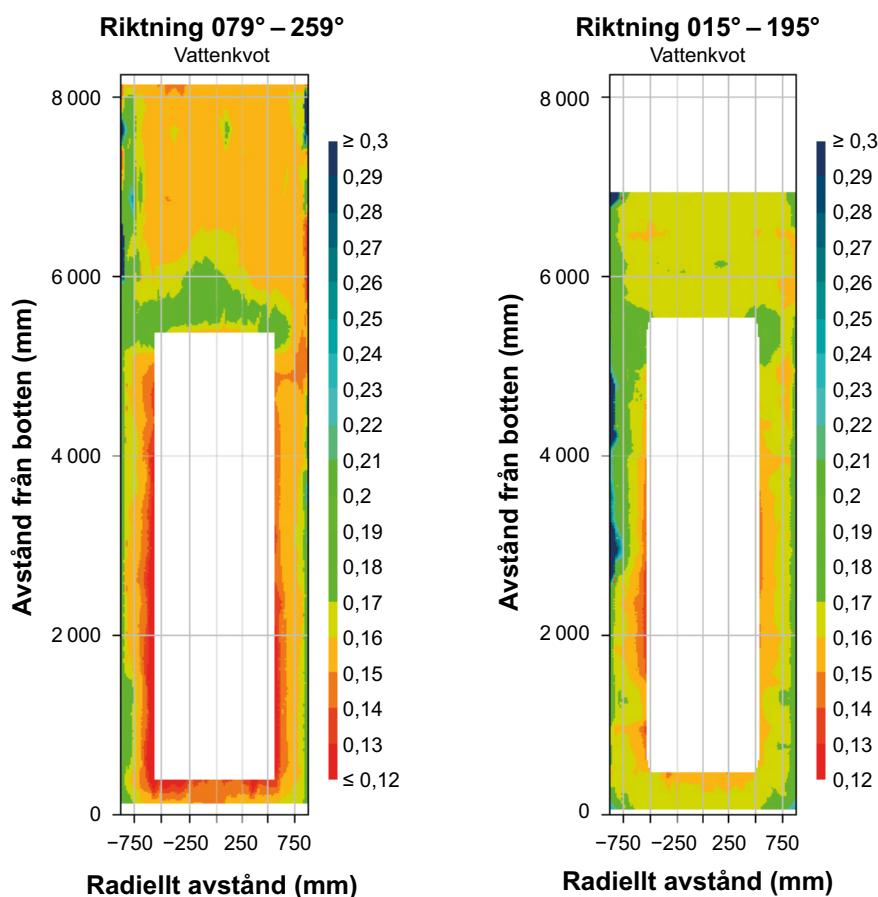
Frågor har uppstått om huruvida vatten från bergssprickor kan förångas mot kapseln i Kärnbränsleförvaret och transporteras ut i återfyllningen, och genom denna process orsaka saltanrikning mot kapseln. En sådan anrikning av salt skulle, om den är omfattande, kunna orsaka korrosion (ibland kallad saunaeffekt). Denna fråga är dock inte aktuell i SFR eller SFL eftersom temperaturen i dessa förvar alltid kommer att vara låg.

Nuläge

Birgersson och Goudarzi (2017) presenterade en utvärdering av risken för saltanrikning. En kritisk inflödes hastighet på 10^{-4} L/min härleddes utifrån en teoretisk beräkning av en anrikad massa av natriumklorid under en 1 000-årsperiod och denna inflödes hastighet relaterades därefter till kapaciteten att transportera ånga, antingen i den inre spalten eller i den yttre pelletsfyllda spalten. De experimentella resultaten från studien indikerade starkt att ångtransportkapaciteten i en KBS-3-buffert inte är tillräckligt stor för att möjliggöra en betydande saltanrikning.

En utvärdering av den naturliga konvektionens potentiella bidrag till fuktomfördelningen presenterades av Sellin et al. (2017). Motivet till detta var att ångdiffusion var den enda mekanismen för fukttransport från varma till kalla delar i de vattenupptagsprediktioner som presenterades i SR-Site. Bentonitens vattenretentionsegenskaper, tillsammans med temperaturskillnaden mellan de varma delarna närmast kapseln och de kalla delarna i tunneltaket, definierar hur långt fuktomfördelningen potentiellt kan fortskrida. Ett fullständigt utjämnat ångtryck skulle innebära en omfattande uttorkning av bufferten. Hur långtgående den faktiska fuktomfördelningen blir i jämförelsen med fallet med endast ångdiffusion, beror på den naturliga konvektionens omfattning.

Frågeställningen kring omfattande ångtransport har aktualiserats till följd av resultaten från det så kallade BÅT2-försöket (Nord et al. 2020). Detta var ett fullskaligt installationstest med en segmenterad buffert som utfördes under 90 dagar med en kapsel med en termisk effekt på 1 700 W. Efter testperioden bröts testet och vattenkvoter och densiteter bestämdes. Resultaten från dessa mätningar visar att det redan efter 90 dagar hade skett en noterbar fuktomfördelning från ringarna runt kapseln till cylindrarna ovanför kapseln (figur 10-6). Nord et al. (2020) påpekar också att mer arbete bör göras för att undersöka hur bufferten beter sig under tidskalor som är längre än installationsfasen.



Figur 10-6. Vattenkvotsfördelning i bufferten efter 90 dagars uppvärmning i två installationsförsök; med segmenterade block (vänster) och med massiva block (höger). Från Nord et al. (2020).

Program

- Fortsatta studier av fuktomfördelning från buffert till återfyllning för att öka förståelsen för den naturliga konvektionens bidrag till fuktomfördelningen från varma till kalla delar av bentoniten i buffert och återfyllning. Arbetet innefattar såväl laborietester som modellutveckling.
- Prediktion av fuktomfördelning och saltanrikning. Detta arbete ska utmytna i en uppdaterad beskrivning av fuktomfördelningen och saltanrikningen i ett deponeringshål/tunnelsektion med lågt vatteninflöde.

10.1.6 Mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden

I Kärnbränsleförvaret är det sannolikt att ett antal deponeringshål kommer att vara torra även i ett längre tidsperspektiv. I en vattenmättad buffert sker ingen mikrobiell aktivitet om densiteten/svälltrycket är tillräckligt högt. Inte heller i en helt torr bentonit kan någon mikrobiell aktivitet ske. Man kan dock tänka sig ett fönster innan fullt svälltryckt har uppnåtts, men där det ändå finns en viss mängd vatten i systemet. I ett sådant mellanläge skulle mikrobiell omvandling av sulfat till sulfid teoretiskt kunna ske, varpå bildat svavelväte potentiellt skulle kunna skada kapseln. För bufferten kan detta hanteras genom att begränsa mängden sulfat som bufferten får innehålla, men för återfyllningen är detta inte lika enkelt eftersom mängden installerat material är betydligt större. En annan begränsning för processen är förekomsten av näringsämnen för mikroberna, vilka kan ha sitt ursprung i form av föroreningar i bentoniten eller komma med grundvatten. Buffertbentoniten är därför kravställd så att maximalt en procent av massan får utgöras av organiskt material.

Nuläge

En serie försök har genomförts för att undersöka aktiviteten av sulfatreducerande bakterier (SRB) i bentonit som funktion av tillgången till vatten (flytande eller gasfas) (Svensson et al. 2020). I försöken användes kommersiellt tillgängliga *Pseudodesulfovibrio aspoensis*, och gips (sulfatkälla), laktat (kol och energikälla) samt näringsämnen tillsattes. Enbart i försök där ett överskott på flytande vatten fanns (synlig vattenfas) bildades svavelväte. I försök med 100 procent relativ fuktighet, men utan någon synlig vattenfas, kunde inget svavelväte detekteras. Detta innebär att de hydratskikt som finns på montmorillonitens yta (bentonitens mikroporer) och som utgör den så kallade kristallina svällningen, inte räcker för att svavelväte ska kunna bildas och detekteras.

Kompletterande experiment med mikrober anrikade från ett borrhål Äspölaboratoriet har genomförts (Svensson et al. 2020). Dessa visade på samma resultat som experiment med den kommersiellt tillgängliga *Pseudodesulfovibrio aspoensis*. Eftersom mikrobiell sulfidproduktion experimentellt inte kunde observeras vid 100 procent relativ fuktighet, utan enbart med flytande vatten, så ser SKB i nuläget ingen anledning att vidare studera mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden.

Program

- Kunskapsläget bedöms i nuläget vara tillräckligt och det planeras därför inga ytterligare studier angående mikrobiell sulfidbildning under omättade förhållanden.

10.2 Bentonitmaterialens egenskaper i mättat tillstånd

När lerbarriärerna är vattenmättade utgör hydraulisk konduktivitet, svälltryck och skjuvhållfasthet de viktigaste egenskaperna för barriärfunktionen. Dessa egenskaper kan relateras till en given bentonits densitet. Sambandet är unikt för varje bentonittyp och för en given typ av bentonit varierar egenskaperna med dess sammansättning, till exempel med montmorillonithalten. Hydraulisk konduktivitet och svälltryck är de viktigaste egenskaperna hos lerbarriärerna i samtliga förvar. Skjuvhållfastheten är däremot framför allt av betydelse för bufferten i Kärnbränsleförvaret.

10.2.1 Materialsammansättning

Huvudsyftet med det materialforskningslaboratorium för analys av och experiment med bentonitmaterial som finns vid Äspölaboratoriet är att det ska fungera som en infrastruktur för forskning, utveckling och kvalitetskontroll av bentonit samt att stimulera intern kompetensutveckling. De metoder som huvudsakligen används vid laboratoriet är katjonutbyteskapacitet (CEC), pulverröntgendiffraktion (XRD), röntgenfluorescensspektroskopi (XRF), utbytbara katjoner (EC), vattenhalt, skrymdensitet, kornstorleksfördelning, svälltryck, hydraulisk konduktivitet, skjuvhållfasthet, kompakteringsegenskaper och värmeledningsförmåga.

Nuläge

Analys av material från fältförsök som ABM5, LOT A3 och LOT S2 och av ett bentonitliknande material från Kirunagruvan pågår. Förfining och testning av metoderna, liksom löpande karakterisering av intressanta bentoniter, har skett i viss omfattning.

Program

- Fortsatt utvärdering av olika bentonitmaterial och prover från fältförsök med avseende på hydro-mekaniska och mineralogiska egenskaper.

10.2.2 Svälltryck och hydraulisk konduktivitet

Svälltryck och hydraulisk konduktivitet hos bentonit är två viktiga kravställda parametrar. Svälltrycket ska vara tillräckligt högt för att inhibera mikrobiell aktivitet, men samtidigt inte så högt att det mekaniskt skadar kopparkapseln. Den hydrauliska konduktiviteten ska vara så pass låg att diffusion blir den dominerande transportprocessen.

I forskningslaboratoriet har mer än tio mätceller installerats för att mäta svälltryck och hydraulisk konduktivitet. I dessa studeras framför allt hur svälltrycket ser ut i olika bentoniter och hur svälltrycket påverkas av exempelvis montmorillonithalten. De flesta bentoniter uppför sig på liknande sätt, men det finns exempel på material som avviker och kan ha ett betydligt högre svälltryck än andra bentoniter vid en given densitet.

Nuläge

Mätning av svälltryck och hydraulisk konduktivitet har utförts på ett antal olika bentoniter, samt på prover från fältförsöken ABM5, LOT A3 och LOT S2. I ABM5 utsattes ett antal olika bentoniter för temperaturer långt över den måltemperatur som finns i KBS-3-designen och resultaten tyder på att uppvärmningen inte haft någon signifikant inverkan på varken svälltrycket eller den hydrauliska konduktiviteten.

Program

- Fortsatt karakterisering av referensmaterial, det vill säga bentoniter från olika platser, främst genom mätning av svälltryck och hydraulisk konduktivitet.
- Ytterligare mätningar på prover från långtidsförsök i fält, bland annat från Prototypförvarets inre sektion samt ett antal paket från försöken med alternativa buffertmaterial (ABM), samt LOT S3. Resultaten från ABM5 kommer att sammanställas och avrapporteras.
- Studier planeras för att klargöra varför undersökt bentonit från Bulgarien har ett svälltryck som skiljer sig signifikant från övriga undersökta bentoniter.

10.2.3 Skjuvhållfasthet

Bentonitens skjuvhållfasthet är en viktig parameter för dimensioneringen av kapseln samt för utvärderingen av Skjuvfallet i analysen av säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret. Skjuvhållfastheten ökar med bentonitens densitet och svälltryck, men de mätningar som genomförts tyder på att det också finns andra parametrar som påverkar. Eftersom SKB har definierat ett tekniskt utformningskrav för skjuvhållfasthet, är det nödvändigt att testa alla aktuella buffertmaterial med avseende på detta. Skjuvhållfastheten bestäms med fördel med ett triaxialförsök, men kan även bestämmas med det försöksmässigt enklare enaxliga tryckförsöket. Eftersom kravet på hållfasthet i den tekniska utformningen av bufferten uttrycks i termer av enaxlig tryckhållfasthet, är det enaxliga tryckförsöket en lämplig försökstyp för närmare studier av hållfastheten.

Nuläge

En omfattande studie av hållfasthet hos bentonit finns avrapporterad i Dueck et al. (2022). En slutsats från denna studie är att skjuvhållfastheten är mer relaterad till svälltrycket än till materialets densitet. Skjuvhållfastheten påverkas även av jonbyte, uttorkning och uppvärmning, men effekterna är små.

Kunskapsläget när det gäller skjuvhållfasthet hos bentonit bedöms vara bra. Det finns en praktisk mätmetod som kan tillämpas för att kontrollera att valda bentonitmaterial klarar de uppställda kraven och i nuläget finns det inget behov av ytterligare forskning inom området.

Program

- I samband med brytningen av Prototypförvaret kommer den enaxliga tryckhållfastheten att mätas på prover från bufferten i deponeringshålet med syfte att verifiera att de uppmätta värdena stämmer med resultat från tidigare studier.

10.3 Bentonitmaterialets utveckling efter vattenmättnad

När bentoniten har nått vattenmättnad och de önskade egenskaperna har uppnåtts är det viktigt att dessa egenskaper bibehålls under hela den tid som förvaret väntas fungera. För ökad förståelse av bentonitmaterialets utveckling efter mättnad krävs insatser framför allt kring buffertförluster till följd av kolloidfrigörelse/erosion samt kring mikrobiell sulfidbildning och sulfidtransport i buffert och återfyllning. Insatser krävs också kring långsiktig stabilitet med hänsyn tagen till temperatur, järninnehåll och cement (BHA i SFL). Mindre insatser krävs kring växelverkan bentonit/koppar. Försök kan också behöva genomföras för att verifiera adekvat hantering av diffusion av lösta ämnen, särskilt sulfid, i bentonit. En annan fråga är hur gas, som bildas genom korrosion eller andra processer, kan ta sig igenom en bentonitbarriär utan att bentonitens eller de andra barriärernas egenskaper förändras.

10.3.1 Gastransport

I fallet när en kopparkapsel i Kärnbränsleförvaret är skadad och vatten kommer i kontakt med insatsen, kommer vätgas att bildas inuti den skadade kapseln. Löst gas transporteras långsamt genom bentonitbufferten. Det är mycket troligt att en gasfas och ett gastryck kommer att byggas upp inuti kapseln och därför viktigt att kunna visa att detta tryck inte kommer att medföra några negativa konsekvenser för förvarets funktion. Detta innebär att gasen måste kunna ta sig ut utan att skada buffert eller berg. För BHA i SFL är frågeställningen i princip densamma.

För att den gas som bildas i avfallskollin och betongkonstruktioner i SFR ska kunna ta sig ut, krävs att gasförande passager bildas i barriärerna. Gastransporten och mängden förträngt vatten från siloförvaret och bergssalarna bestäms av de ingående barriärernas utformning och barriärmaterialens egenskaper.

Nuläge

Lasgit togs i drift i februari 2005 och bröts 2020–2021. Försöket var ett fullskaletest med en kapsel i ett deponeringshål och avsikten var att studera gastransport genom bentonit. Totalt sett genomfördes sex gasinjekteringstester i filter på kapselns mantelyta och ett test i kapselns botten där hela kapselns tomvolym trycksattes. Alla resultat från Lasgit finns avrapporterade i Cuss et al. (2022). Resultaten visar entydigt att gas tar sig igenom en bentonitbuffert vid ett tryck som ligger mycket nära svälltrycket i bufferten. Det finns inget som tyder på att tryckuppbyggnaden och gastransporten skulle ha någon påverkan på vare sig bentonitbufferten eller de andra barriärernas egenskaper. Dessa slutsatser kan även tillämpas på bentoniten i BHA i SFL.

Program

- Kunskapsläget när det gäller gastransport i bentonit bedöms vara bra och i nuläget planeras inga ytterligare studier inom området.

10.3.2 Sulfidbildning och sulfidtransport

Sulfid löst i porvattnet i bentoniten kan agera som korrodant för kopparkapseln. För att bedöma den diffusiva transporten av sulfid i bentoniten till kapseln behövs kunskap om vilka koncentrationer av sulfid som kan vara aktuella i porvattnet. Mikrobiella processer kan under vissa betingelser ge upphov till bildning av sulfid, och bentonitens torrdensitet eller svälltryck har en stor påverkan på den mikrobiella aktiviteten (avsnitt 10.1.6). Sulfid är i princip ett problem bara för kopparkapslarna i Kärnbränsleförvaret, vilket gör att dessa processer inte är lika relevanta för SFR och SFL.

Nuläge

Inriktningen under den senaste Fud-perioden har varit att testa, vidareutveckla och ta fram data med en ny försöksuppsättning, utformad för att bestämma densitetsgränsen för mikrobiell sulfidproduktion i bentonit (figur 10-7). Metoden bygger på den som presenterades i Bengtsson et al. (2017), med skillnaden att den bildade sulfiden analyseras med röntgenfluorescens i stället för med en radiometrisk teknik. Sulfidmätningarna kan kompletteras med mätningar av förbrukad näring och sulfat. Detta gör att försöken blir avsevärt enklare att genomföra och att fler tester kan genomföras inom en given tidsrymd.



Figur 10-7. *Försöksceller med bentonit, koppar och mikrober under vattenmättnad. Efter vattenmättnaden tillsätts näringsämnen och sulfat. Sulfidbildning på koppar som funktion av bentonitens densitet kan sedan mätas.*

SKB har testat att mäta diffusivitet för sulfid i bentonit med hjälp av jonselektiva elektroder (Hedström 2022). Den uppmätta effektiva diffusiviteten är $\sim 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ för torr densiteter i spannet 1 500–1 550 kg/m^3 .

Program

- Undersökningar för att experimentellt visa gränsen för mikrobers överlevnad uttryckt i buffertens densitet eller svälltryck kommer att fortsätta. Fokus kommer att ligga på att generera data för att få bra statistik, försöka att bestämma vilka faktorer som är viktiga samt att förfina själva metodiken.

10.3.3 Kolloidfrigörelse/erosion

Efter installation av bentonitbufferten i Kärnbränsleförvaret tar den upp vatten och sväller. Svällningen förhindras av deponeringshålets väggar och därigenom utvecklas ett svälltryck. Detsamma gäller för återfyllningen i BHA i SFL. Om sprickor skär deponeringshålet eller förvarssalen finns det vid skärningsytorna inte några fasta hinder för svällning. Lokalt fortsätter då svällningen in i sprickorna tills jämvikt eller stationära förhållanden uppnås. Denna fria svällning kan leda till att enskilda montmorillonitskikt separeras (dispergeras) och att en del av bufferten därigenom kan transporteras bort med grundvattnet. Den maximala fria svällningen av bentonit är starkt beroende av laddning och koncentration av jonerna i skikt mellanrummen. Vid alltför låga koncentrationer av lösta ämnen i grundvattnet kan avståndet mellan de enskilda montmorillonitskikten öka så mycket att systemet lera/vatten får en kolloidal karaktär, det vill säga enskilda eller små grupper av montmorillonitskikt uppträder som enskilda kolloidala partiklar. Avgörande för eventuell kolloidbildning i ett förvar är den lokala saltkoncentrationen i porvattnet, tillsammans med förhållandet mellan mono- och divalenta joner i montmorilloniten vid bentonit/ grundvattenkontakten.

Massförlusten genom kolloidfrigörelse/erosion kan beräknas utifrån:

- Lera som expanderar ut med svällning i sprickorna i deponeringshålets vägg. Denna massa blir ytterst liten om utsvällningen är begränsad.
- Lera som frigörs som kolloider i gränsskiktet mellan den utsvällda leran i en spricka och grundvattnet och som sedan transporteras bort med det strömmande vattnet.
- Lera som frigörs som kolloider i gränsskiktet mellan den utsvällda leran i en spricka och grundvattnet och som sedan transporteras bort med gravitation i sluttande sprickor.

I analysen av säkerhet efter förslutning, SR-Site, kunde inte betydelsen av kolloidfrigörelse och erosion avfärdas och i ett fåtal deponeringshål var den beräknade massförlusten så stor att advektiva förhållanden inte kunde uteslutas.

Nuläge

Den modell som användes för att beräkna massförlust i SR-Site (Moreno et al. 2010) utvecklades sedan vidare och den uppdaterade modellen finns dokumenterad i Neretnieks et al. (2017). Det fanns dock även i den nya modellen en hel del kvarstående osäkerheter. Dessa rörde sig främst om expansion i sprickor, hantering av en sekundär gel eller flockbildning, friktion och hantering av gravitation. Under den gångna Fud-perioden har denna modell utvecklats vidare och resultatet finns dokumenterat i Pont et al. (2020) samt Pont och Idiart (2022). Där presenteras en numerisk modell som hanterar väggfriktion, flöde tillsammans kemisk erosion, och sedimentation på grund av gravitation. Modellen har utvecklats och delvis validerats med experimentella data från småskaliga tester.

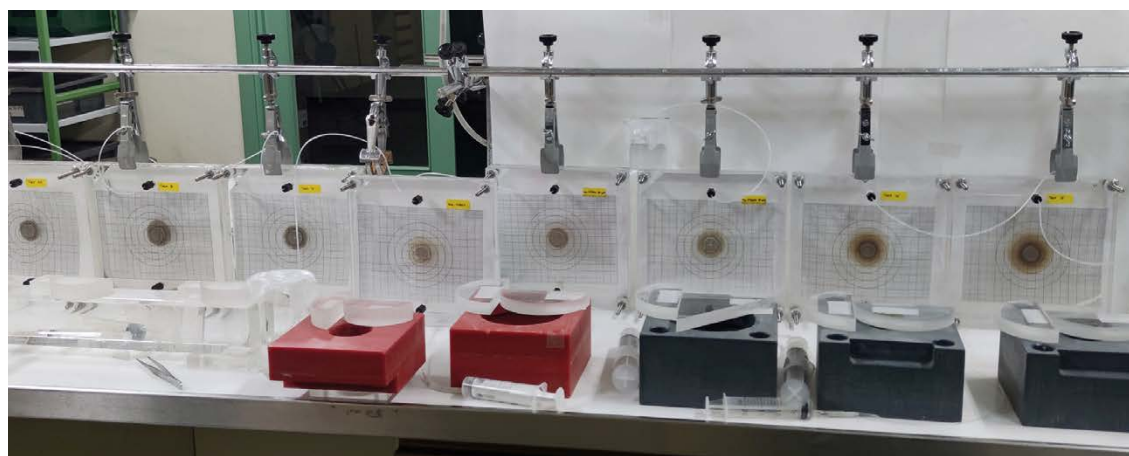
Experimentellt arbete för att ytterligare studera processerna har pågått under hela perioden genom försök i konstgjorda sprickor. I försöken studerades expansion, erosion och sedimentation som funktion av bland annat sprickapertur, sprickornas skrovlighet, horisontella och vertikala sprickor, bentonittyp och flöde. Figur 10-8 visar en försöksupställning med sedimentationsförsök.

Program

- Fortsatt utveckling av den modell som presenterades i Pont och Idiart (2022), med fokus på att optimera modellen numeriskt, validera modellen gentemot laboratorieexperiment samt att inkludera flockbildning och transport av flockulerade partiklar. Avsikten är också att försöka förenkla modellen till ett analytiskt uttryck som kan användas för att beräkna massförlust i säkerhetsanalyser.
- Det experimentella programmet för att undersöka kolloidfrigörelse/erosion kommer att fortsätta med ungefär samma omfattning och inriktning som tidigare. Avsikten är att ta fram data och resultat som kan stödja modellutveckling och modelltestning.

10.3.4 Självläkning av bentonit

Vid en eventuell massförlust av bentonit från en barriär, till exempel till följd av erosion, är det viktigt att kunna förstå hur barriären självläker. Detta är en del av bentonitens mekaniska utveckling och programmet för detta beskrivs i avsnitt 10.1.4.



Figur 10-8. Försöksupställning med sedimentationsförsök i olika typer av konstgjorda sprickor.

10.3.5 Mineralstabilitet

Bentonitlera har valts som barriärmaterial eftersom det förväntas vara långsiktigt stabilt i de miljöer som råder i de olika förvarerna. Bentoniten kan vara stabil i hundratals miljoner år i sin bildningsmiljö, men förändringar i miljön kan leda till en relativt snabb förändring av mineralstrukturen. De faktorer som främst styr stabiliteten är temperatur, tillgång till kalium och pH. Även redoxförhållandena kan vara viktiga. Kaliumhalterna i svenska grundvatten är generellt låga, men det kan finnas relativt stora mängder kalium i berget. En förhöjd temperatur förväntas i bufferten i Kärnbränsleförvaret under en relativt kort period, medan återfyllningen och bentonitbarriärerna i SFR och SFL aldrig utsätts för någon förhöjd temperatur. I Kärnbränsleförvaret undviks interaktionen mellan högt pH och bentonit med ett krav på låg-pH-material, emedan denna process är högst reell både i SFR och i BHA i SFL.

Bentonit kan brytas ner av joniserande strålning, men vid de relativt låga strålningsnivåer som förväntas i samtliga förvar kan denna process anses som försumbar.

Viktiga fältförsök för att studera mineralstabilitet i bentonitlera är LOT och ABM i Äspölaboratoriet. I LOT undersöks åldrandet av MX-80-bentonit med en kopparvärmare vid 90 °C och 130 °C. I ABM undersöks över tio olika bentoniter från olika delar av världen tillsammans med en stålvärmare vid 130 °C (undantaget är försökspaket 5 (ABM5) där effekter av högre temperaturer undersöktes). I båda typerna av försök används kompakterade bentonitringar på 30 cm diameter, staplade runt värmaren som är totalt fyra meter hög i LOT och tre meter hög i ABM.

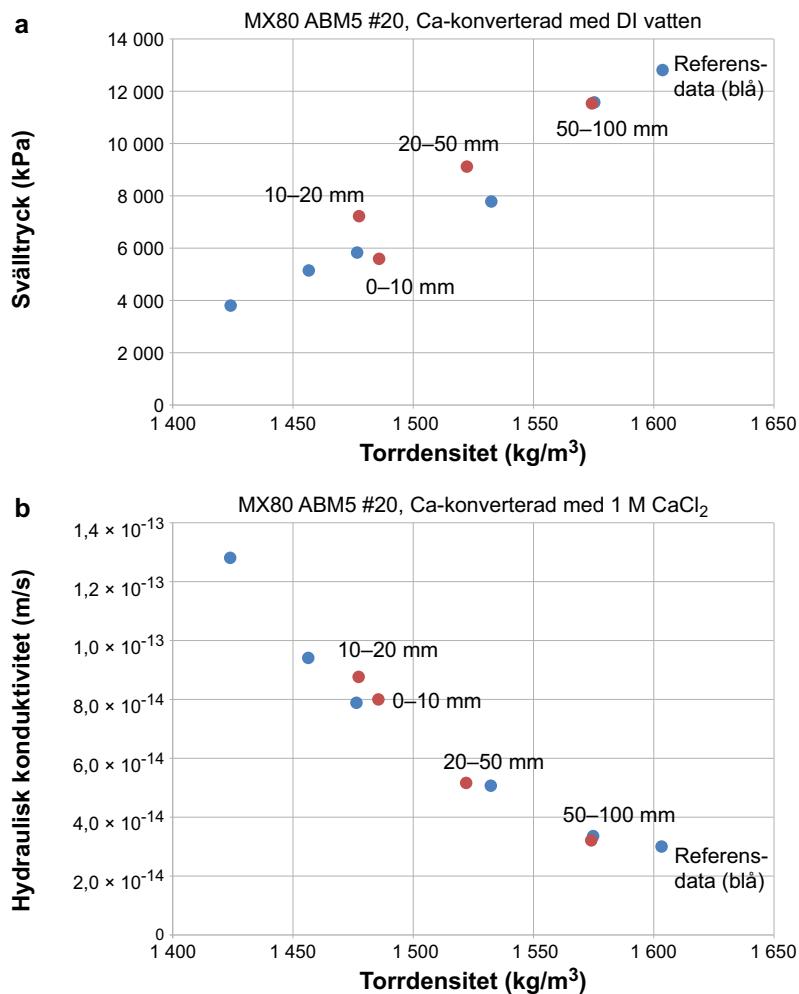
Nuläge

Under den senaste Fud-perioden har arbete med bentoniter från ABM5, LOT A3 och LOT S2 genomförts och pågår fortfarande. Fältförsöken ABM2 och ABM5 planeras att avrapporteras tillsammans under 2022.

I ABM5 studerades mineralstabilitet vid mycket höga temperaturer (cirka 200 °C) och utan ett pålagt vattentryck för att motverka kokning. Det gjorde att det blev ett relativt torrt experiment med små tecken på kemisk omvandling eller påverkan, men istället desto mer fysisk påverkan genom att block sprack och föll isär. Smektitomvandling kunde inte observeras i ABM5 och inte heller observerades några nya lermineral, vare sig i SKB:s egna studier eller i Kaufhold et al. (2021). Kumar et al. (2021) visade med Rietveld-utvärdering av röntgendiffraktionsdata att smektithalten höll sig konstant efter försöket, men SEM/EDX visade vissa tecken på kemisk förändring i lermineralen i nära kontakt med järnvärmaren. Kemin närmast värmaren påverkas av många faktorer, såsom järn från korrosion eller ackumulering av magnesium, kalcium, svavel eller klorid. Det gör att denna typ av tolkningar, baserade enbart på kemidata, behöver stödande data från diffraktion eller spektroskopi för att kunna bekräftas. Däremot påverkades CEC något av den höga temperaturen och uttorkningen, vilket observerades både i SKB:s egna mätningar och av Kumar et al. (2021). Detta skiljer sig från andra SKB-försök där bentoniten varit vattenmättad och temperaturen varit lägre (90–130 °C).

Efter återkompaktering av bentoniten i ABM5 kunde inte några signifikanta förändringar ses på centrala egenskaper som svälltryck eller hydraulisk konduktivitet (figur 10-9), vilket bekräftar slutsatsen från de mineralogiska undersökningarna att ingen degradering av smektiten har ägt rum och att CEC-förändringen antingen är reversibel när smektiten åter vattenmättas under svälltrycks-mätningen, eller att den inte har någon inverkan på egenskaperna.

Under Fud-perioden har försöken LOT A3 och LOT S2 i Äspölaboratoriet brutits. De tidiga analyserna fokuserade mest på bentonitens kemiska innehåll, vattenhalt och andra övergripande parametrar, samt på kopparkorrosion i kontakt med värmaren och de kopparprover som placerats i bentoniten (Johansson et al. 2020). Liksom i flera andra fältförsök med bentonit observerades att magnesium ackumulerats mot värmaren utan känd orsak. Likaså hade gips ackumulerats vid eller i närheten av värmaren, medan klorider inte visade några tecken på att ackumuleras mot värmaren. I de tidiga övergripande utvärderingarna av mineralogiskt innehåll i paketen så kunde inte några signifikanta förändringar observeras (Johansson et al. 2020). Arbetet är dock pågående och en rapport med mer fokus på bentonitens mineralogi och kemi kommer att sättas samman när allt experimentellt arbete är slut-



Figur 10-9. (a) Svälltryck och (b) hydraulisk konduktivitet vid olika densiteter för ABM5-prover av Wyoming bentonit (MX80). De röda punkterna är från fältförsöket och de blå är referensdata från råbentoniten. Avstånden anger avstånd mellan provet och försökets värmerör.

fört. Ännu icke publicerade Mössbauer-data (Åbo Akademi, Finland) för LOT A3 och LOT S2 indikerar att en del av järnet i bentoniten har reducerats från Fe(III) till Fe(II). Uppskattningsvis utgjorde Fe(II) cirka 30 procent av Fe(total) i referensleran, medan det i material från fältförsöket utgjorde cirka 50 procent Fe(II). Förändringen var densamma nära kapseln som nära berget och ingen skillnad kunde ses mellan A3- och S2-försöken. Liknande förändringar sågs även i bentonitprover från Prototypförvarets yttre sektion, men reduktionsmekanismen är ännu inte förklarad (artefakter från de elektriska värmarna kan inte uteslutas). Inga irreversibla effekter av en partiell reduktion av Fe(III) har konstaterats på egenskaperna hos montmorillonit, men det kan inte uteslutas att reduktionen kan ha en viss påverkan på egenskaperna under reducerande eller syrefria förhållanden.

Dioktatedrisk smektit har identifierats i Kirunagruvan, ner till djup på minst 1 200 meter under ytan. Smektiten är relativt ren och sväller med vatten, precis som väntat. Kirunagruvan är en av Europas största järnmalmsbildningar och där har upp till cirka 50 meter tjocka, mjuka förändringszoner av lera uppstått i nära anslutning till magnetit-apatit-avlagringarna. Det finns indikationer på att smektiten i Kiruna kan vara extremt gammal och därför potentiellt mycket intressant som en naturlig analog om man kan datera den. Berget och de hydrologiska förhållanden i Kirunagruvan liknar de i Forsmark och smektitförekomsterna är i samma storleksordning som bentonitbarriärerna, vilket gör att det är en intressant analog till ett KBS-3-förvar. Arbetet med att karakterisera Kirunasmektiten i prover tagna från olika positioner i gruvan pågår löpande.

Program

- Fortsatt analys och rapportering av experimenten LOT A3 och LOT S2.
- Rapportering av resultat från de genomförda studierna på ABM5, LOT A3 och LOT S2.
- Brytning och analys av kvarvarande fältförsök i Äspölaboratoriet (Prototypförvarets inre sektion, LOT S3 och de återstående tre ABM-paketerna).
- Mineralogiska och hydromekaniska studier av material från Kiruna.
- Experiment i olika skalor för att undersöka om olika bentoniter är kemiskt neutrala mot metallisk koppar och att för att öka kunskapsläget om de eventuella korrosionsprodukter som bildas.
- Fortsatt utveckling av THC-modell för att bättre kunna beskriva bentonit-cementinteraktion, retrogradupplösning av mineral och omfördelning av anjoner under den omättade perioden. Modellen kommer att testas inom Prototypförvaret och Task Force EBS.
- SKB planerar att ansöka om tid för att göra synkrotronmätningar på bentonitprover med XANES (röntgenabsorptionsspektroskopi) för att fortsätta att öka kunskapen om järnets redoxkemi i bentonit. Om möjligt planeras också mätning på prover som varit i kontakt med koppar för att öka kunskapen om de bildade korrosionsprodukterna.

10.3.6 Radionuklidtransport

Sorption av radionuklider är en av de viktigaste fördröjande säkerhetsfunktionerna i SFR. Sorption sker huvudsakligen på cementen i barriärerna och avfallsmatrisen och är beroende av den kemiska sammansättningen hos vattnet i förvaret. I silon kan dock sorption på bentonitmaterial i siloväggen också vara av betydelse för vissa radionuklider. Om egenskaperna hos silobentoniten ändras, till exempel genom interaktion med cement, så kommer även sorptionsegenskaperna att ändras.

I Kärnbränsleförvaret har sorption av radionuklider på buffertmaterialet underordnad betydelse för förvarets funktion eftersom den förväntade livslängden på kapseln är så lång. I SFL-BHA däremot kan sorption i bentonitbufferten ha betydelse för retardationen av vissa radionuklider.

Program

- Kompletterande experiment för att mäta sorption av radionuklider i blandningar av bentonit och omvandlingsprodukter (zeolit) och i ren bentonit.

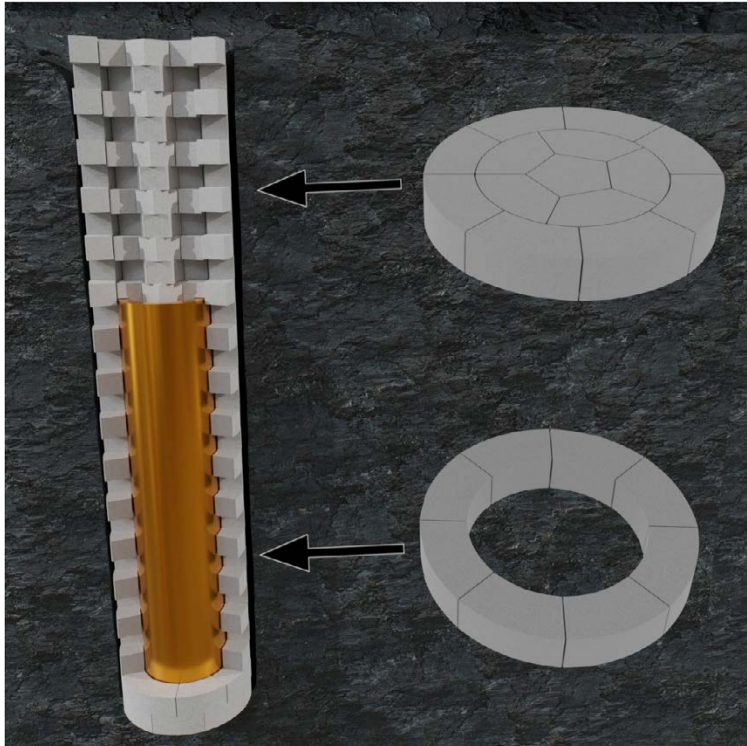
10.4 Utformning av barriärer

10.4.1 Buffert i Kärnbränsleförvaret

Nuläge

Sedan Fud-program 2019 har SKB fattat beslut om att övergå till så kallade segmenterade buffertblock. Det betyder att buffertblocken har delats upp i mindre bitar som är betydligt lättare att producera (figur 10-10). De mindre blocken är anpassade för att kunna tillverkas i standardpressar som används inom keramisk industri. Produktionen av blocken kan därmed i hög grad automatiseras och blir därför effektivare. Försök har utförts för att utreda hur den segmenterade bufferten beter sig under installationsfasen. Dessa försök har gjorts i full skala (Nord et al. 2020) med värmare och naturligt vatteninflöde från berget. Resultaten visar att skillnaderna mot den tidigare utformningen med solida block är små. Dessa resultat gäller under installationsfasen, hur blocken beter sig därefter hanteras i avsnitt 10.6 och framåt.

Undersökningar av hur vattenupptag sker med olika pellettyper har utförts (Lundgren och Johannesson 2020) för att få en bättre förståelse hur pellettypen påverkar buffertens funktion. Resultaten tyder på att samma typ av pellet som används i återfyllningen skulle kunna användas i bufferten.



Figur 10-10. Skiss på utformningen av de segmenterade blocken.

Den utveckling som sker inom buffertutformningen handlar främst om att anpassa komponenterna i bufferten för att kunna tillverka dem industriellt. I detta ingår att sätta realistiska krav och toleranser, både på de individuella komponenterna och på installationen. Hur vatteninflödet i deponeringshålet påverkar installationsprocessen behöver också studeras vidare, både genom modellering och i fullskaleförsök, för att fastställa hur snabbt installationen behöver kunna ske. I processen med att anpassa produkterna för industrialisering kommer det även att utvärderas om samma pelletstyp som används i återfyllningen även kan användas i spalten mellan block och bergvägg.

Program

- Fullskaletester för att bestämma gränser för hur lång tid installationen av buffert kan ta vid olika vatteninflöden i deponeringshålet. Data från dessa försök används sedan för att utveckla och kalibrera THM-modeller.
- Fastställa krav och toleranser för alla ingående komponenter i bufferten samt produktionsanpassa dessa.
- Utvärdera möjligheten att använda extruderade istället för rullkompakterade pellets i bufferten.

10.4.2 Återfyllning i Kärnbränsleförvaret

Nuläge

Utformningen av återfyllningen har anpassats till den senaste inriktningen på tunneltvärsnitt. Hur deponeringstunnlarna produceras och deras resulterande geometri påverkar mängd och geometri hos återfyllningskomponenterna och därmed vilken torrdensitet som nås vid installationen. Deponeringstunnlarnas dimensioner påverkar därför både utformningen av återfyllningen och produktionen av återfyllningskomponenter och dessutom påverkas även installationen. Efter det buffertuppsvällningstest (Sandén et al. 2017) som gjordes vid Äspölaboratoriet, så har ett förslag på hållfasthetskrav på återfyllningsblocken tagits fram.

Mycket av det planerade arbetet för återfyllning innebär, liksom för bufferten, att anpassa produkterna i återfyllningen för att de ska kunna tillverkas industriellt. Det betyder att anpassa toleranserna och kraven på återfyllningskomponenterna. I detta arbete ingår även att optimera utformningen mot de uppdaterade krav för styvhet på återfyllningen som är under framtagande, för att säkerställa att buffert inte sväller upp mer än acceptabelt i återfyllningen. Därtill kommer det att behövas en fortsatt utveckling av metoder för att hantera vatteninflöden under installation av återfyllningen.

Parallellt med den fortsatta utvecklingen av den nuvarande utformningen av återfyllningen så kommer även alternativa utformningar att utredas. Ett av dessa alternativ är så kallad granulerad återfyllning, där deponeringstunnlarna fylls med ett bentonitgranulat som har processats så att en hög torrdensitet kan uppnås. Denna metod skulle kunna förenkla installation och tillverkning av återfyllning, men bedöms ha kvarvarande utvecklingsbehov för att SKB ska kunna ändra utformningen. Granulerad utformning för KBS-3 har introducerats och utvärderats av Posiva i Finland (Posiva 2021c).

Program

- Fortsatt utredning om fördelar och nackdelar med granulerad återfyllning, där bland annat försök och utredningar utförda av Posiva kommer att tas om hand och utvärderas.
- Anpassa utformningen av återfyllningen efter uppdaterade krav på dess styvhet. Kraven på återfyllningens styvhet är viktiga för att kunna säkerställa att återfyllningen kan motverka buffertuppsvällning.
- Utveckling av metoder för att hantera höga vatteninflöden under återfyllningsinstallationen.

10.5 Tillverkning samt kontroll och provning av buffert- och återfyllningskomponenter

10.5.1 Kvalitetssäkring av bentonitmaterial

Nuläge

Metoden för anpassad utformning av buffert och återfyllning har fortsatt utvecklats under den gångna Fud-perioden och i Kronberg et al. (2020) beskrivs hur provtagning och dimensionering av torrdensitet på buffert och återfyllning planeras gå till.

Mätningar på bentonitmaterial kommer att behöva fortsätta för att bygga upp mer kunskap om materialen och för att få ett större statistiskt underlag. Även nya metoder som har tagits fram kommer att fortsätta utvecklas, till exempel för att mäta termisk ledningsförmåga på pellets och hållfasthet på omättade bentonitblock.

Program

- Fortsatt utveckling och tillämpning av mätmetoder för kvalitetssäkring av bentonitmaterial.
- Framtagande av preliminär kvalificeringsstrategi för bentonitmaterial.
- Framtagande av provtagningsprogram för bentonitleveranser.

10.5.2 Tillverkning av buffertkomponenter

Nuläge

I och med att beslut togs om att övergå till segmenterad buffert gjordes fullskaleförsök för att undersöka hur den segmenterade bufferten fungerar vid realistiska förhållanden under installationsfasen. För detta försök tillverkades över 300 segmenterade buffertblock enligt uppsatta specifikationer med gott resultat (Nord et al. 2020). Även de stora block, som utgjorde referensutformning innan segmenterade buffertblock infördes, har tillverkats under perioden. Detta gjordes med olika bentonitmaterial (Johannesson et al. 2020). För ett av materialen uppstod problem vid tillverkningen på grund av att

det bestod av ett väldigt fint material, vilket ledde till att det vid kompakteringen var svårt att få ut all instängd luft ur blocket. Det medförde att blocken sprack efter kompakteringen, vilket visar på vikten av kontroll över materialets granulstorleksfördelning.

Produktionssystemet för buffertkomponenter har gått igenom i syfte att försöka förenkla och optimera produktionsprocessen.

Program

- Ytterligare tester med segmenterade block för att öka kunskapen om tillverkning.
- Tillverkning av block för demonstrationsförsök samt genomförande av sådana försök för att testa metodiken inför en kommande kvalificering och för att ytterligare demonstrera att metoden kan uppfylla de specifikationer på blocken som krävs.

10.5.3 Tillverkning av återfyllningskomponenter

Nuläge

I och med att buffertblocken nu planeras att produceras med samma typ av pressar som återfyllningsblocken, kan erfarenheter från buffertproduktionen appliceras även för återfyllningsproduktionen. Precis som för buffertproduktionen så har även produktionssystemet för återfyllningskomponenter genomlysts och insatser har gjorts för att effektivisera systemet.

Program

- Produktionssystemet för återfyllningen kommer att fortsätta utvecklas och optimeras för att kunna bygga en så effektiv anläggning som möjligt. Block kommer även att tillverkas inför de demonstrationsförsök som planeras att genomföras.

10.6 Deponering och installation av buffert och återfyllning

10.6.1 Generellt gällande maskinutveckling

Nuläge

Maskinerna och utrustningarna som är kopplade till installationer i deponeringstunnlarna följer ett antal utvecklingssteg enligt den teknikutvecklingsmodell som tagits fram på SKB. I nuläget har alla maskiner och utrustningar genomgått konceptfasen. Under arbetet med konceptfaserna framkom en del utmaningar, samtidigt som vissa förutsättningar i angränsande delar av slutförvarsutformningen har ändrats eller kan komma att ändras. Förändrade förutsättningar är viktigt att ta med sig till kommande faser i teknikutvecklingen.

Program

- De flesta utrustningarna är under Fud-perioden redo att gå in i designfasen. I denna fas kommer den information och de tester som har gjorts under konceptfasen att användas för att börja designa de skarpa utrustningarna som behövs i slutförvaret. Vidare kommer elektrifiering av fordon och utrustningar att bli ett viktigt fokus.

10.6.2 Deponering

Nuläge

Två prototyper av deponeringsmaskinen har byggts, vilka båda testats i Äspölaboratoriet. Testerna har visat på både styrkor och svagheter och dessa erfarenheter kommer att utgöra underlag för den kommande designfasen. Några kringliggande parametrar, såsom körbanor och tvärsnittsarea på deponeringstunneln, kan fortfarande påverka utformningen i viss omfattning.

Ett nytt koncept för täckning av deponeringshålen har utvecklats. Strålskärmsluckan, som tidigare planerades att användas, var tänkt att fixeras i förhållande till deponeringshålet och erbjuda en fixpunkt gentemot hålets position. Den senaste prototypen av deponeringsmaskinen läste därför av strålskärmsluckans läge för positionering relativt deponeringshålet. Det nya konceptet för täckning av deponeringshålen innebär ett löst liggande täcklock utan fixering mot deponeringshålet och locket kan därför inte tjänstgöra som referenspunkt för deponeringsmaskinens position. En ny metod för att positionera deponeringsmaskinen relativt deponeringshålet behöver därför utvecklas och verifieras.

Program

- Designfasen för deponeringsutrustning påbörjas när de slutliga förutsättningarna är fastställda.
- Vidareutveckling av lockhanteringsutrustning.

10.6.3 Installation av buffert

Nuläge

Ett koncept för bufferthanteringsutrustning har tagits fram. Karossen utgörs av en ramstruktur med löpande kran och som är försedd med lyftbord och matarbanor för pallhantering. Även om utrustningen är framtagen för de tidigare buffertblocken, bedöms den fungera bra även med segmenterade block. För att hantera pellets till bufferten används pelletcyllindrar som kan hanteras av bufferthanteringsutrustningen. Pelletcyllindrarna har testats och fungerar som tänkt.

Om bufferten utformas som sektionerade block måste dessa även muras för att stapeln ska vara stabil. Med murning menas att spalterna mellan sektionerna inte ska ligga rakt ovanför varandra, utan varje skift vrids så att spalterna får ett mönster likt en murad vägg. Det ställer krav på att verktyget kan vridas mellan varje nivå som installeras. Tidigare prototyp på lyftverktyget har inte denna funktion och verktyget behöver därför konstrueras om och kompletteras med både vridfunktion och mätutrustning/styrssystem för funktionen.

Program

- Utveckla processen för installation av segmenterad buffert.

10.6.4 Installation av återfyllning

Nuläge

Återfyllningen är avsedd att installeras av en industrirobot som lyfter ett block i taget från en transportpall och placerar det på blockstapeln. Metoden har tidigare testats i full skala under realistiska förhållanden (Arvidsson et al. 2015). Sedan dess har utvecklingen fortsatt och metoden förfinats. Optimeringar för att kunna öka installationshastigheten planeras.

Program

- Vidareutveckla metoden för pelletinstallation.
- Optimering av installationsroboten och transporter.

10.7 Borrhålsförslutning

Nuläge

Under den gångna Fud-perioden har utvecklingen av metoden för borrhålsförslutning fortsatt. I detta ingår optimeringar och förändringar i materialval för att med bibehållen funktion effektivisera både produktion av komponenter och praktiskt genomförande.

Alternativa lösningar på den kopparexpander som används idag har utretts, då ursprunglig design kräver hög precision i diameter och dessutom kräver borrhög för att monteras.

Vad gäller betong som förslutningskomponent har SKB beslutat att frångå användningen av låg-pH-betong, då denna vid installationsförsök inte motsvarat krav på tillförlitlighet. Den betong som nu anvisas i metoden är Weber undervattensbetong. Då risk för erosion identifierats vid fyllning av sektioner med sand, har SKB också beslutat att använda en något grövre standardiserad fraktionsstorlek.

Befintlig förslutningsmetod är främst utvecklad för subvertikala-vertikala borrhål, vilket endast täcker en del av alla borrhål i anslutning till försvarsområdena. Vidare behöver säkerställas att metoden är anpassad för varierande typer av borrhål. Fortsatt metodutveckling och utredningar är därför nödvändiga. Vid de fältförsök som har genomförts har nya möjligheter till optimering och effektivisering identifierats, bland annat när det gäller teknik för gjutning av långa sektioner med betong.

Program

- Klargörande av kravbild för förslutning av borrhål med påverkan på säkerhet efter förslutning i anslutning till utbyggt SFR.
- Utvärdering av långtidsegenskaper hos betong som ska användas till borrhålsförslutning.
- Utredning av möjligheten av att försluta borrhål med betong som permanent förslutningsmetod.
- Vidareutveckling av befintlig metod för borrhålsförslutning för att innefatta även flacka och horisontella borrhål.
- Utredning av vilken fraktionsstorlek på supportmaterial som ska användas i sprickzoner med större apertur.
- Optimering av metod och arbetsprocess utifrån fältförsök:
 - Vidareutveckling av kopparexpander.
 - Tillverkning av kompletterande utrustning för praktiskt genomförande med borrigg.
 - Effektivisering av arbetsprocess.

10.8 Förslutning

10.8.1 Förslutning av Kärnbränsleförvaret

Nuläge

Ingen ytterligare utveckling har gjorts gällande förslutning av Kärnbränsleförvaret. Den kravbild på förslutningen som finns idag är inte komplett och behöver uppdateras innan vidare arbete görs.

Program

Under Fud-perioden kommer kravbilderna att uppdateras till en nivå som gör att den kan användas för att gå igenom designen av förslutningen. Efter det kommer förslutningsplanerna att uppdateras. Planerade aktiviteter:

- Uppdatera kravställning för förslutning av Kärnbränsleförvaret.
- Uppdatera förslutningsplan för Kärnbränsleförvaret.

11 Berg

Berggrundens viktigaste funktion för SKB:s befintliga och planerade slutförvar är att säkerställa stabila mekaniska och kemiska förhållanden över den tid som det deponerade avfallet ska isoleras från människor och miljö. Berggrunden ska också utgöra en barriär som så långt som möjligt förhindrar eller fördröjer transporten av radionuklider från slutförvaret till ytsystemet. För att detta ska kunna uppnås behövs tillräcklig kunskap om förhållandena i berggrunden och om de processer som förändrar de mekaniska och kemiska förhållandena i och kring förvaren. En stor del av de forskningsfrågor som berör berget och slutförvarsanläggningarnas bergutrymmen är gemensamma för de tre förvaren SFR, Kärnbränsleförvaret och SFL. De genomförda och planerade forskningsaktiviteterna beskrivna i detta kapitel kopplar till byggbarhet och dimensionering av slutförvaren samt till detaljundersökningarna under förvarens uppförande.

11.1 Karakterisering och modellering av bergets egenskaper och beteende

Att karakterisera och modellera bergets egenskaper och beteende, speciellt med hänsyn till dess långsiktiga utveckling, handlar om att kvantifiera in situ-bergspänningar, spänningsförändringar, deformationer och bergbrott orsakade av olika processer (till exempel bergguttar, glaciation, uppvärmning, jordskalv) och fastställa dessa faktorerens effekt på bergets stabilitet och på vattenflöde. Karakterisering av processer relevanta för säkerheten efter förslutning och deras effekter på bergets egenskaper görs genom såväl numerisk modellering som laboratoriestudier.

11.1.1 Bergets mekaniska egenskaper och beteenden

Bergmassan består av intakt berg som genomkorsas av diskontinuiteter som sprickor, deformationszoner, gångar, defekter och korngränser. Kopplade modeller av bergmassan förutsätter att dess mekaniska egenskaper kan beskrivas på ett korrekt sätt med hänsyn till de inneboende diskontinuiteterna i olika skalor. Empiriska metoder för karakterisering av bergmassans mekaniska egenskaper lämpar sig inte för att analysera det långsiktiga beteendet, där kopplade termiska, hydrauliska, mekaniska och kemiska processer (THMC) samt anisotropi och skalberoende spelar roll.

Nuläge

Det klassiska sambandet mellan storleken av ett prov av intakt berg och dess Uniaxial Compressive Strength (UCS) som presenterades av Hoek och Brown (1980) har under senare år ifrågasatts (till exempel Masoumi et al. 2015, Quiñones et al. 2017), bland annat för att det potentiellt kan påverka prediktioner av bergmassans egenskaper och speciellt då förståelsen av och förmågan att förutse spjälkning (avsnitt 11.1.2). Laboratorieförsök på intakta bergprover från Forsmark har visat en mycket begränsad storlekseffekt för prover som är större i diameter än de standardmässiga 54 mm (Delgado-Martín et al. 2021a). Ytterligare ett testprogram pågår för att bestämma brottseghet (eng fracture toughness), och resultat finns nu för prover från olika djup för huvudbergarten i Forsmark (Delgado-Martín et al. 2021b, 2022). Dessa data kommer att användas för studier av sprickpropagering (avsnitt 11.1.2).

SRM-modeller (Synthetic rock mass) utgörs av numeriska simuleringar av bergmassan, där diskontinuitetsnätverket explicit representeras tillsammans med den ”intakta” bergdelen däremellan och där de båda komponenterna kan deformeras och gå till brott. SKB har under senaste Fud-perioden bidragit till utveckling och effektivisering av de numeriska modelleringsverktyg som används för SRM-modellering (3DEC (diskontinuum-modellering), PFC (partikelbaserad modellering) och FLAC3D (kontinuumbaserad modellering)). Utvecklingsinsatserna har exempelvis lett till kortare beräknings-tider genom parallelliserad modellering och inkludering av PFC i FLAC3D-plattformen. Dessutom har en ny typ av kontaktlogik implementerats i PFC, vilken i framtiden kommer att möjliggöra modellering av sprickpropagering orsakad av olika laster.

Trots att SRM-modellering fortfarande är begränsad av numerisk beräkningskapacitet, som sätter gräns för modellstorlek (skala), detaljeringsgrad och komplexitet, har modellerna på ett avgörande sätt kunnat bidra till framtagandet av DFN-baserade, analytiska ekvationer som kan beskriva bergmassans egenskaper (DFN – Discrete Fracture Network). Den senaste utvecklingen inom SRM-modellering har lett till att man skapar ett kvantitativt samband mellan en DFN-baserad bergmassem modell och dess effektiva (eller ekvivalenta) elastiska egenskaper (Davy et al. 2018, Darcel et al. 2021a). En detaljerad beskrivning av den nyutvecklade metodiken för uppskattning av bergmassans elastiska egenskaper presenteras i Davy et al. (2018), Darcel et al. (2021a) och Hakami et al. (2022). Detta är det första steget i utvecklingen av ett gemensamt DFN-baserat ramverk för uppskattning av bergmassans egenskaper. Metoden kommer att utvecklas vidare för att inkludera uppskattning av bergmassans hållfasthet och hydromekaniskt kopplade egenskaper.

Insatser planeras också för att öka förståelsen av spänningstensorns påverkan på flödesmönster över enskilda sprickor och spricknätverk. De hydromekaniska egenskaperna hos enskilda sprickor har avgörande betydelse för bergets barriärfunktion, eftersom de styr hur lokal spricktransmissivitet varierar med spänningen och bergmassans styvhet samt hur hållfasthet påverkas i olika skalor. SKB har tillsammans med Posiva och NWMO drivit i Post-projektet (Fracture parameterisation for repository design and post-closure analysis), vilket syftade till att förbättra kunskapen om hur en sprickas skjuvegenskaper kan skalas upp. Baserat på rekommendationer från Post-projektet (Siren et al. 2017) samarbetar NWMO och SKB nu i en andra projektfas, vilken syftar till att öka den grundläggande förståelsen av ett antal sprickmekaniska aspekter, förbättra befintliga eller utveckla nya konstitutiva modeller samt driva utvecklingen och valideringen av numeriska modeller som simulerar sprickbeteende (Jacobsson et al. 2021).

I samband med höga normalspänningar på sprickor minskar effekten av skjuvinducerad dilatation (volymökning), men det är fortfarande osäkert hur mycket detta påverkar transmissiviteten (SKB 2019, avsnitt 12.1.1). I den nuvarande förståelsen av THM-aspekter i Forsmark och Laxemar (Hökmark et al. 2010) antas att höga normalspänningar dämpar transmissivitetseffekter. Under de senaste Fud-perioderna har modeller för enstaka sprickor (med aperturvariabilitet) som inkluderar bergspännings-effekter utvecklats (Stigsson 2019, Zou et al. 2018, Zou och Cvetkovic 2020). Dessa studier indikerar att det ur ett säkerhetsanalysperspektiv inte nödvändigtvis är konservativt att bortse från en sådan variation i sprickapertur vid modellering av flöde och radionuklidtransport.

De osäkerheter som fortfarande finns rörande sprickornas hydromekaniska egenskaper handlar således främst om skaleffekten (det vill säga sprickegenskapers skalberoende) och om förändringar av transmissivitet som funktion av skjuv- och normallast.

Program

Utvecklingen av en metodik för DFN-baserad karakterisering av bergmassans egenskaper som grundar sig på de senaste vetenskapliga rönen fortsätter och kommer att omfatta:

- Etablering av effektiva elastiska egenskaper i olika skalor baserade på DFN-realiseringar och kombinationer av mekaniska egenskaper hos intakt berg och sprickor under olika spänningsförhållanden.
- Beräkning av bergmassans kopplade hydromekaniska egenskaper i modeller som relaterar hydraulisk sprickapertur (spricktransmissivitet) till mekanisk sprickapertur och in situ-spänning. Regler för ansättning av egenskaper i DFN-modeller, till exempel sprickors transmissivitet, kommer att analyseras och utvecklas så att ett relevant initialtillstånd kan erhållas. Det kommer också att utredas hur detta kan konceptualiseras i storskaliga modeller (till exempel DarcyTools och 3DEC).
- Modellering och in situ- och/eller laborietester jämförs för att etablera grundläggande samband för att beskriva hur de effektiva hydromekaniska egenskaperna varierar med spänningsfältet och porvattentrycket.

Mekaniska egenskaper och parametrar för enskilda sprickor behöver fastställas eller uppskattas för att kunna bedöma sprickors påverkan på byggbarhet och på förvarens säkerhet efter förslutning:

- Resultaten från Post-projektets laborietester i kombination med teoretisk och numerisk analys ska användas för att förbättra befintliga konstitutiva modeller eller utveckla nya modeller, med syftet att kunna förutsäga sprickmekaniskt beteende baserat på data från fältundersökningar.

För att förbättra den hydromekaniska förståelsen av sprickor planeras insatser för att klarlägga sambanden mellan sprickapertur och transmissivitet och hur detta påverkas av spänningsfältets förändring:

- Litteraturstudie med koppling till flödestester i samband med skjuvning i kristallint, hårt, berg och analoga material.
- Flödesförsök under cyklisk normal lastning/avlastning för att kvantifiera effekten av normal last på spricktransmissiviteten.
- Flödesförsök under skjuvning med olika initiala normalspänningsnivåer för att avgöra om, och i så fall i vilken omfattning, höga normalspänningar begränsar transmissivitetssökningen.
- Numerisk, hydromekaniskt kopplad modellering av flödesförändring som effekt av skjuvning.

11.1.2 Inducerad rörelse i bergmassan orsakad av termisk, seismisk eller glacial belastning

Rörelser i bergmassan som orsakas av termisk, seismisk eller glacial belastning kan leda till att bergets spricknätverk och sprickors egenskaper förändras. Det omfattar till exempel spjälkning, utveckling av bergskadezon samt sprickbildning, sprickdeformation, spricktillväxt, sprickkorsning och sprickavslutning.

Nuläge

Inom området bergskadezon och spjälkning har följande arbeten påbörjats och delvis avslutats under de senaste två Fud-perioderna:

- SKB driver i samarbete med RISE ett industridoktorandprogram vid Linnéuniversitetet i Kalmar om experimentella laboriebaserade metoder för bedömning av spjälkningspotentialen. En ny laborietestmetod har utvecklats (Jacobsson et al. 2018) för att reproducera spjälkningsprocessen i stora kärnprover under förhållanden som liknar de i ett deponeringshål i hårt berg.
- SKB har medverkat i utvecklingen av mikromekaniska (partikelbaserade) numeriska simuleringsmetoder i 3D. De senaste framstegen presenteras i Potyondy och Mas Ivars (2020) och Potyondy et al. (2020).
- Inom ett pågående doktorandprogram vid Imperial College, London, har en sprickmekanikbaserad numerisk teknik utvecklats för att modellera mekanisk spjälkning. Preliminära resultat presenteras i Saceanu et al. (2020a, b).

SKB har alltsedan Fud-program 2007 (SKB 2007) utrett mycket långsiktiga processer för bergets hållfasthetsutveckling (till exempel Potyondy 2007, Damjanac och Fairhurst 2010). Ett antal studier om sprickdeformation (öppning/stängning, dilatation under skjuvning), sprickbildning, spricktillväxt, sprickkorsning och sprickavslutning kortsiktigt och långsiktigt har pågått under den senaste Fud-perioden:

- Den uppdaterade DFN-metodiken (Selroos et al. 2022) gör det möjligt att generera DFN-geometrier baserade på förenklade, bergmekanikbaserade spricktillväxtregler. I DFN-metodiken ingår också kopplat hydromekaniskt sprickbeteende, vilket detaljeras i Hakami et al. (2022). Utveckling pågår av en metod för att analysera konsekvenserna av en spänningsförändring på spricknätverks konnektivitet (på grund av potentiell spricktillväxt) och på de enskilda spricktransmissiviteterna samt hur bergmassans effektiva permeabilitet påverkas av olika scenarier.
- I en pågående studie undersöks hur sprickapertur och modus (drag- eller skjuvinducerad) påverkas av geologi, topografi, vattenportryck och spänningsfältet (Moon et al. 2020). Målet är att försöka hitta bergmekanikbaserade omständigheter som kan förklara den observerade spridningen av förekomsten av sprickor samt deras öppning och modus i Forsmark.
- Ett program pågår för att studera effekten av hydromekanisk koppling på flödet i hydrogeologiska modeller under glaciationsscenarier.

Program

Ett flertal aktiviteter med syfte att öka kunskap om och förmåga att uppskatta bergskadezon i allmänhet, och speciellt vad gäller spjälkning kring deponeringshål och -tunnlar, planeras. Målet är att undersöka dessa processers betydelse för Kärnbränsleförvarets säkerhet efter förslutning samt möjligheter till optimering av dess layout. Insatserna fokuserar även på att öka kunskapen om bergskadezonens inverkan på transmissiviteten som effekt av spänningsförändringar orsakade av berguttag samt seismisk, termisk och glacial last. Planerade insatser inkluderar:

- Fortsättning av industridoktorandprojektet vid Linnéuniversitetet angående karakterisering av spjälkningsprocess i laboratoriemiljö.
- Modellering och vidareutveckling av partikelbaserade numeriska koder för att öka modelleringskapaciteten i 3D (framför allt för spjälkning och jordskalv).
- Fortsättning av ett nyligen påbörjat MSc-projekt vid Dalhousie University, Kanada, med fokus på kontinuumbaserade metoder för modellering av bergskadezon och spjälkning.
- Fortsättning av ett doktorandprojekt vid Imperial College som använder och, vid behov, vidareutvecklar en numerisk kod för spjälkningsmodellering baserad på sprickmekanik.
- Modellering med tre olika numeriska metoder (partikelbaserad, kontinuumbaserad och sprickmekanikbaserad) för att studera spjälkning och utveckling av spänningsinducerad bergskadezon.
- Utveckling av en probabilistisk metodik planeras för att uppskatta sannolikheten för spjälkning såväl som dess geometri. Metoden ska ta hänsyn till variabiliteten i bergmassans egenskaper samt bergspänningsfältet i förhållande till deponeringstunnelns riktning.

För uppskattning av sprickdeformation (öppning/stängning, dilatation under skjuvning), sprickbildning, spricktillväxt, sprickkorsning och sprickavslutning på både kort och lång sikt planeras följande:

- Utveckling av en teoretisk och numerisk metodik för att studera påverkan av spricknätverkets och bergmassans styvhet, hållfasthet och permeabilitet på grund av sprickdeformation, sprickbildning, sprickpropagering och sammanlänkning under olika scenarier (berguttag, glaciationscykel med och utan permafrost, termisk last, jordskalv) och deras konsekvenser för slutförvarets säkerhet. Även deformationszonsreakivering och deformationszonspropagering ska adresseras.
- Förfining av metodiken för förenklad, bergmekaniskt baserad DFN-generering, baserat på resultaten från jämförelser mellan verkliga spricknätverk (från fältdata), DFN-realisationer baserade på de förenklade geomekaniska reglerna samt på sprickmekanikbaserade metoder.
- Fortsättning av den pågående studien om sambandet mellan geologi, topografi, vattenportryck, spänningsfältet och sprickapertur och ”mode” (drag- eller skjuvinducerad).
- Kompletterande litteraturstudie och datainsamling avseende bergets långsiktiga hållfasthet. Studien ska ta hänsyn till spänningskorrosion vid sprickändar i alla belastningsfall (drag, skjuvning, rivning) i och med att spricktillväxten inte bara sker under drag, utan även under skjuvning eller rivning vid starkt inspända förhållanden (Backers 2005, Backers och Stephansson 2012).

För en uppdatering av det underlag för termisk dimensionering av slutförvaret som användes i SR-Site planeras följande:

- Analyser av termisk, mekanisk, termomekanisk och hydromekanisk utveckling av berget i Forsmark (Hökmark et al. 2010).

11.1.3 Bergspänningar

Kunskap om det aktuella bergspänningsfältet i Forsmark och dess utveckling under olika scenarier utgör en nyckelkomponent för utformningen av Kärnbränsleförvaret, såväl som för analysen av säkerhet efter förslutning. De osäkerheter kring bergspänningsmodellen för Forsmark som finns, kommer att reduceras under byggprocessen genom att modellen kan förfinas med hjälp av nya mätningar och indirekta observationer. Datainhämtning för detta sker genom det planerade detaljundersökningsprogrammet. Dessutom planeras utveckling av en standardiserad metodik för att möjliggöra uppdatering och verifiering av bergspänningsmodellen i samband med insamling av nya

data under uppförandet av Kärnbränsleförvaret. Här ingår utveckling av en standardiserad metodik för kvalitetskontroll och klassning av nya och befintliga spänningsmätningar samt vidareutveckling av en tensorbaserad probabilistisk metodik för karakterisering och kvantifiering av spänningsfältet och dess variabilitet.

Nuläge

Baserat på deformationszonsmodell v 2.3 för Forsmark (Stephens och Simeonov 2015) har bergspänningsmodellen uppdaterats i 3D (Hakala et al. 2019), med syfte att förbättra metodiken för att i hög upplösning (blockelementstorlek 30–100 m) beskriva rumslig variabilitet i spänningsellipsoidens form och riktning. Den numeriska analysen inkluderar en jämförelse mellan en förenklad rätlinjig deformationszonsmodell och en mer realistisk modell med undulerande deformationzoner. Modelleringen utfördes med modelleringsverktyget 3DEC, vilket är baserat på den distinkta elementmetoden (Itasca 2019).

Metodiken för platsmodellering avseende bergspänningar och bergmekaniska egenskaper har uppdaterats (Hakami et al. 2022). Ett program för kompletterande bergspänningsmätningar under uppförandefasen, baserat på LVDT-metoden (Linear Variable Differential Transformer-metoden, Hakala et al. 2013) och konvergensmätningar under utbyggnadsfasen, har utvecklats.

Figueiredo et al. (2020) har använt en tensorbaserad probabilistisk metod utvecklad av Gao och Harrison (2018a, b) på Forsmarksdata och på 3D-modelldata från Hakala et al. (2019). Den nya metodiken möjliggör en matematisk kvantifiering av variabiliteten, identifiering av spänningsdomäner samt stokastisk generation av spänningstensorer från fördelningen.

Utveckling av en metodik för regelbunden uppdatering av bergspänningsmodellerna har påbörjats i form av ett doktorandprojekt (StressBay) som drivs av SKB i samarbete med NWMO vid universitetet i Toronto. Arbetet syftar till att vidareutveckla den ovannämnda tensorbaserade probabilistiska metodiken (Javaid och Harrison 2021, Javaid et al. 2021).

Överborrning utan spänningsmätningar som utfördes under våren 2021 på borrhävar från 550 meters djup från ett borrhål i rampområdet för det planerade Kärnbränsleförvaret visar kärnor av bra kvalitet och inga tecken på ”ring disking” (Hakami och Holmberg 2021). Baserat på detta resultat utvärderar SKB möjligheten av att utföra framtida spänningsmätningar i samma borrhål innan byggstart av Kärnbränsleförvaret, vilket skulle kunna bidra till en bättre karakterisering av spänningsfältet på förvarsdjup.

Program

Den nya uppdaterade bergspänningsmodellen för Forsmark i 3D (Hakala et al. 2019) är en av komponenterna i den uppdaterade metodiken för fortlöpande bearbetning av geologiska data och bergspänningsdata som utvecklas och som kommer att utgöra en bas för uppdaterade beräkningar av risken för spjälkning och stabilitet inom olika förvarsvolymer. Den uppdaterade metodiken kommer också att ge randvillkor för övrig modellering av inducerade sprickrörelser (orsakade av seismisk, termisk eller glacial belastning) och kopplade hydromekaniska processer. Modellen kommer sedan att uppdateras löpande i samband med uppdateringar av den geologiska strukturmodellen och när nya bergspänningsdata (direkta och indirekta) finns tillgängliga i samband med uppförandet av Kärnbränsleförvaret. I övrigt planeras följande aktiviteter:

- Revidering och omvärdering av befintliga data tillsammans med nya data när det gäller förekomst av ring disking, core disking och borrhållsutfall (eng breakouts).
- Utveckling och tillämpning av en plan för kvalitetskontroll för överborrning och LVDT-baserade spänningsfältsmätningar innan byggstart av Kärnbränsleförvaret.
- Vidareutveckling av den tensorbaserade metodiken för karakterisering och kvantifiering av spänningsfältet och dess variabilitet (StressBay-projektet) samt uppskattning av bergspänningsfältets utveckling vid olika glaciationsscenarier. Detta används sedan som input i mekaniska, hydromekaniska och termohydromekaniska processanalyser (till exempel Hökmark et al. 2010).

11.2 Modellering av diskreta spricknätverk

I en kristallin berggrund utgör sprickorna den huvudsakliga förbindelsen för grundvattenflöde och transport av lösta ämnen mellan markytan och ett förvar. Sprickorna utgör även försvagningsplan när det gäller bergmassans hållfasthet. Att förstå sprickigheten i bergmassan är således av vikt under konstruktion och uppförande samt för att utföra trovärdiga säkerhetsanalyser för SKB:s olika slutförvar.

Nuläge

SKB har utvecklat en metodik för modellering av diskreta spricknätverk (Selroos et al 2021). Metodiken utgör ett samlat grepp för utveckling av ett diskret spricknätverkskoncept som kan ligga till grund för alla avnämning, och som tar hänsyn till både bergmekaniska och hydrogeologiska egenskaper vid framtagandet. Modelleringsmetodiken för mekaniska och hydromekaniska egenskaper för enskilda sprickor redovisas i (Hakami et al 2022). Metodiken för spricknätverksmodellering speglar mycket av det aktuella kunskapsläget beskrivet nedan.

Utvecklingen av genetisk sprickgenerering, det vill säga modellering av spricknätverk som utgår från att sprickor växer från sprickfrön, pågår (FracMan 2022, Lavoine et al. 2020, 2021, LeGoc et al. 2019, Libby et al. 2019). Användningen av konceptet inom flödes- och transportmodellering har fortsatt. Specifikt har effekter av öppna/slutna sprickor, intern aperturvariabilitet samt hydromekanisk koppling undersökts. Resultaten indikerar att den hydromekaniska kopplingen samt koppling mellan sprickstorlek och -apertur är viktiga komponenter för att reproducera flödeskaraktistik i mätta fältdata. Arbetet fokuserar nu på transportkaraktisering och är inne i en rapporteringsfas (Darcel et al. 2021b).

Kvantifiering av osäkerheter i geometriska mätdata och hur dessa osäkerheter kan påverka den probabilistiska fördelningen av flödes- och transportegenskaper genom en skjuvad spricka har redovisats i Stigsson (2019). Studien visar också på hur heterogen aperturfördelning och preferentiella flödesvägar, som uppstår då syntetiska sprickor utsätts för en förenklad numerisk skjuvalgoritm, förändras beroende på spänning, sprickytans råhet och flödesriktning. En mer avancerad numerisk modell för koppling mellan mekaniska och hydrogeologiska egenskaper presenteras i Li B et al. (2020) där flödesförändring över en heterogen spricka studeras som funktion av normalspänning, och i Zou et al. (2021) där flödesförändring över en heterogen spricka studeras som funktion av skjuvning av spricka.

Ett arbete har genomförts för att studera effekten av heterogenitet på olika skalor i ett DFN genom att utvärdera hydrauliska test (Zou och Cvetkovic 2020). Specifikt har effekten av heterogenitet på nätverksskala, och av heterogenitet i apertur (eller transmissivitet) mellan sprickor och inom en och samma spricka, undersökts då data från flödesloggning i borrhål används för hydraulisk parametrering av DFN-modeller. Traditionellt försummas ofta variabiliteten inom en spricka i DFN-modellering. Resultaten indikerar dock att variabiliteten inom sprickor kan vara en källa till osäkerhet i utvärderade samband, om en utvärderingsmetod används där denna heterogenitet försummas.

En studie har påbörjats för att studera alternativa och förenklade geometriska spricknätverksmodeller, specifikt kanal- eller rörnätverksmodeller, som alternativ till DFN-modeller. Syftet är dels att studera om dessa alternativa modeller kan reproducera flödet i DFN-modellerna till en lägre beräkningskostnad, dels att studera om dessa alternativa modeller resulterar i andra transportegenskaper och storhetsmått för användning i senare analyser av säkerhet efter förslutning.

Ett doktorandprojekt som syftade till att förstå och kvantifiera igensättning av sprickor genom ansamling av geologiskt material (eng clogging) under olika hydrogeologiska och hydrogeokemiska betingelser har avslutats (Doolaege 2021). I avhandlingen redogörs för hur graden av öppenhet, det vill säga om sprickor i ett nätverk är öppna eller slutna, korrelerar mot andra sprickstorheter såsom djup, sprickriktning eller normalspänning. Vidare har en grafmetodik använts för att simulera nätverkseffekter av sprickors öppenhet och visat att en sådan metodik, som är mindre kostsam än en full DFN-modell, kan vara ett användbart verktyg för att göra hydrogeologiska prediktioner i ett spricknätverk (Doolaege et al. 2020). Resultaten från studien har delvis redan gått in i den nya DFN-metodiken (Selroos et al. 2022) och kommer att användas för ytterligare förfining av metodikapplikationerna framöver.

Även ett pågående doktorandprojekt inom EU-projektet Enigma har avslutats (Molron 2021). Syftet med projektet var att undersöka om kombinerade flödes-, ämne- och radarmätningar kunde användas för att konditionera spricknätverk på deponeringshållsskala genom användande av pilothål för deponeringshåll. Två vetenskapliga artiklar som detaljerar det experimentella utförandet har publicerats (Molron et al. 2020, 2021). Resultaten visar att metoden inte är industriellt applicerbar, då den är tidskrävande, samt att den testade sprickan var för lågtransmissiv för att metoden skulle fungera optimalt. Dock fick man fram värdefulla resultat då den senare studien indikerade att man vid hydrauliska experiment bör undvika för höga injiceringsstryck för att inte inducera temporära aperturförändringar och därmed transmissivitetsförändringar, hos den undersökta sprickan.

I ett projekt kopplat till den nya modelleringsmetodiken för diskreta spricknätverk, har det testats hur deformationszoner beskrivna som svärmar av mindre sprickor kan förenklas numeriskt (genom uppskalning), och hur den förlorade variabiliteten som kan uppstå som ett resultat av denna uppskalning kan återskapas i transportsimuleringar genom en nedskalningsalgoritm. Traditionellt har deformationszoner beskrivits som plan eller volymer med homogena eller heterogena egenskaper (till exempel djupavtagande transmissivitetsvärden). Dock kan vissa deformationszoner bättre beskrivas som volymer med ökad sprickintensitet och därmed modelleras med DFN-teknik. För modeller i större skala kan det dock bli numeriskt tungt att explicit inkorporera alla dessa sprickor. En praktisk lösning då är att skala upp dessa DFN-beskrivna zoner till ECPM-objekt (ekvivalent kontinuerligt poröst media) och sedan planprojicera egenskaperna på ytor. På detta sätt beskrivs deformationszonerna åter som 2D-objekt i 3D-rymden, men med egenskaper från den underliggande DFN-modellen. För att återskapa den variabilitet som förlorats i uppskalningen, har en metodik utvecklats och testats för att återintroducera variabiliteten i transportsimuleringar. Metodiken utnyttjar funktionalitet i Marfa-koden (avsnitt 11.4.1) och har presenterats i Williams et al. (2021) för fallet med en enskild deformationszon.

Äspö Task Force GWFTS har startat ett nytt samarbetsprojekt, Task 10, där validering och osäkerheter i flödes- och transportegenskaper ska utvärderas. Hittills har det teoretiska ramverket skrivits och presenterats i Lanyon et al. (2021) och experiment som ska generera data för modelleringsgrupperna har utförts. Även möjligheten att använda 3D-utskrivna sprickor har undersökts i Stock (2020) och Stock och Frampton (2021). Samarbetsprojektet rör frågor såsom flöde och transport genom en enskild spricka, ett litet nätverk av ett fåtal sprickor samt ett större nätverk av sprickor.

Program

- Resultat och lärdomar från relevanta spricknätverksmodelleringar kommer att samlas i ett levande dokument, DFN modelleringsmetodik volym 2. En första modellering syftar till att utvärdera metodiken mot är den pågående uppdateringen av spricknätverksmodellen över Forsmarksområdet inom ramen för det så kallade Baseline-arbetet.
- Utveckling av programvaror för modellering av diskreta spricknätverk, exempelvis FracMan, DFN.lab och MoFrac, sker löpande i olika datorkodspecifika samarbetsforum, såsom ”DFN studio” för FracMan tillsammans med exempelvis Posiva i Finland och NWMO i Kanada, se avsnitt 11.4.
- Studien om alternativa kanalnätverksmodeller fortsätter med rapportering. Målet är en vetenskaplig publikation i en erkänd tidskrift.
- Arbetet med uppskalning av deformationzoner beskrivna med DFN-modeller och efterföljande nerskalning i Marfa fortsätter. I det fortsatta arbetet studeras effekten av flera deformationzoner i en modell omgiven av bakgrundssprickor. Denna test är nödvändig innan metodiken kan användas i säkerhetsanalysapplikationer.
- Inom ramen för Äspö Task Force GWFTS Task 10 studeras möjligheten att validera flödes- och transportmodeller. Utifrån mätbara storheter såsom geometri och flöde, undersöks möjligheten att förutsäga transportegenskaper för enskilda sprickor i decimeterskala upp till spricknätverk i dekameterskala.
- Ett doktorandprojekt inom ramen för Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) rörande hydro-mekanisk koppling kommer att initieras. Projektet har som mål att undersöka hur spänningsförändringen som uppstår på grund av bergguttag påverkar sprickors öppningsfördelning och permeabilitet inom den störda zonen.

- Utifrån teorierna i modelleringsmetodiken för DFN samt resultaten från DFN Baseline kommer ”HypoSite” att uppdateras till version 2.0. Detta hypotetiska förvar kan sedan användas för att bedöma behovet av provtagning och ytterligare datafångst under konstruktion av de olika slutförvaren, undersöka om användning av betingade sprickmodeller leder till minskad osäkerhet i beskrivningen av spricknätverket, utnyttjas som riktmärke för utvecklingen av DFN-koncept samt uppskatta effekter av olika konceptuella antagande för sprickornas geometri.

11.3 Seismisk påverkan på förvarens säkerhet

Under de antaganden som gjordes i SR-Site ger effekten av jordskalv på säkerhet efter förslutning ett icke-försumbart riskbidrag för Kärnbränsleförvaret (SKB TR-11-01). Riskbidraget är mycket starkt kopplat till de frekvens-magnitudsamband som föreslagits för kort (Bödvarsson et al. 2006) och lång sikt (Hora och Jensen 2005, Fenton et al. 2006). Osäkerheterna i framför allt de långsiktiga prognoserna kvarstår, i synnerhet vad gäller skalvaktiviteten i samband med en glaciationscykel. Seismisk övervakning (avsnitt 11.3.1) samt undersökningar av paleoseismicitet (avsnitt 11.3.2) bidrar till att minska osäkerheterna i jordskalvsprognoserna och ökar förståelsen kring de mekanismer som driver glacialt inducerade jordskalv. De studier som planeras att genomföras inom Fud-perioden syftar till att ytterligare öka förståelsen för kopplingen mellan nutida seismicitet och de glacialt inducerade skalven. En underskattning av den seismiska aktiviteten medför en underskattning av långsiktig risk, medan en överskattning leder till en överdimensionering av slutförvarsanläggningen.

Jordskalv i närheten av ett slutförvar kan orsaka sekundära rörelser längs sprickor som skär genom deponeringsområdet. Med hjälp av numeriska modeller undersöks jordskalvens effekter på ett KBS-3-förvar och utvärderas om den inducerade skjuvrörelsen överskrider 5 cm eller om skjuvhastigheten överskrider 1 m/s. Modelleringsmetodiken har utvecklats under lång tid (Fälth och Hökmark 2006, Fälth et al. 2007, 2008), och har efter omfattande tester (Fälth et al. 2014) och fallstudier (Fälth et al. 2016, 2017, Fälth 2018) nått en hög mognadsgrad (Hökmark et al. 2019). Emellertid bör modelleringen av sekundärrörelser utvecklas för att reducera konservatismen i kommande säkerhetsanalyser. Utveckling av metodik för jordskalvsmodelleringen och övriga utvecklingsinsatser som indirekt berör skalvmodellering redovisas i avsnitt 11.3.3.

I säkerhetsvärderingen för SFL (SKB TR-19-06) gjordes ingen analys av vilka effekter ett eventuellt jordskalv kan ha på förvarets barriärsystem. I framtida säkerhetsanalyser för SFL behöver barriärsystemets tålighet för dessa processer utvärderas. Resultaten kan bidra till optimering av förvarsdesignen.

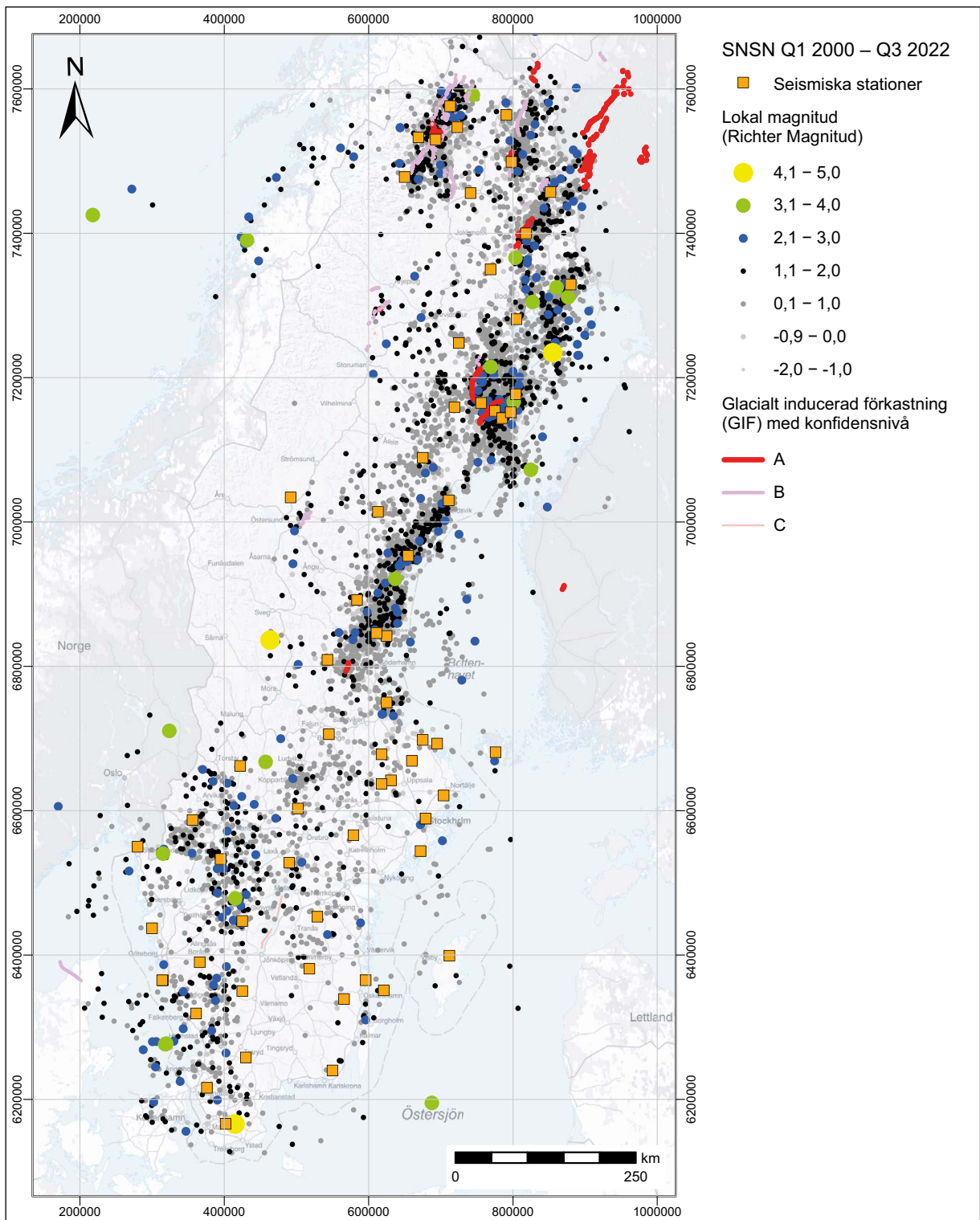
Inga nya undersökningar kring jordskalvseffekter på SFR-förvaret planeras under Fud-perioden. Dock kommer den planerade utbyggnaden av det lokala seismiska nätet i Forsmark att möjliggöra att även skalv i SFR-området kan registreras.

11.3.1 Seismisk övervakning

Seismisk övervakning utgör tillsammans med paleoseismiska studier fundamentet för prediktion av framtida skalvaktivitet i Sverige. Kontinuerlig, långsiktig övervakning av skalv är kritisk för att kunna fånga upp mönster av frekvens och magnitud, som kan variera i både tid och rum. Övervakning av jordskalv i Sverige utförs av det svenska nationella seismiska nätet (SNSN). Sedan 2008, då den sista större utbyggnaden av SNSN instrumenterades (sydvästra Sverige), samlar SNSN kontinuerligt in data i realtid från samtliga stationer, vilket gör att mängden data för analys ökat signifikant jämfört med tidigare år, då endast datasegment från detekterade händelser samlades in. Det nya förfinade seismiska nätet (Lund et al. 2021) har på ett fundamentalt sätt förbättrat möjligheterna till tolkning av jordskalvsaktiviteten.

Nuläge

Det svenska nationella seismiska nätet har sedan starten av det automatiska systemet år 2000 registrerat, lokaliserat och beräknat fokalmekanismer för mer än 10 700 jordskalv med magnituder mellan cirka -1 och 4,3 (figur 11-1). I dagsläget finns 68 fasta stationer installerade tillsammans med ett varierande antal temporära stationer.



Figur 11-1. Jordskelv registrerade av det svenska nationella seismiska nätet (SNSN) under åren 2001–2021. Spår av glacialt inducerade förkastningar (röda linjer) från "International Database of Glacially Induced Faults" (Munier et al. 2020, se även Steffen et al. 2021).

Under den senaste Fud-perioden har ett antal aktiviteter pågått som bidrar till att öka precisionen på seismiska data samt ökar förståelsen för mekanismer som driver seismiciteten på regional och lokal nivå.

En seismisk tomografistudie av den svenska jordskorpan har genomförts (exempelvis Chan 2014). Den resulterande tredimensionella hastighetsmodellen har, tillsammans med en så kallad "multi-event-analys", använts för omlokaliseringar av jordskalven, vilket avsevärt förbättrat precisionen på lägesbestämningarna och beräknade magnituder. Rapportering av dessa aktiviteter pågår.

Nya beräkningar av fokalplanlösningar har genomförts. Resultaten ger information om spännings-tillståndet i jordskorpan och en så kallad spänningsinversion genomförs när man beräknar spänningsfältet på stora djup.

SKB har påbörjat ett projekt för byggande av ett lokalt seismiskt nätverk i Forsmark för att öka upplösning och detektionsnivån av den lokala seismiciteten. Nätverket syftar, i ett första skede, till att mäta de ostörda seismiska förhållandena innan utbyggnaden av SFR och uppförandet Kärnbränsleförvaret.

Program

- Utöver en lokal utvidgning av det fasta nätverket med ett antal temporära stationer (avsnitt 11.3.2) planerar inte SKB för särskilda insatser angående SNSN.
- Insamling av data med det lokala seismiska nätverket i Forsmark planeras att inledas innan 2024. Under de efterföljande åren ska data som samlas in inför och under byggfasen för SFR-utbyggnad och Kärnbränsleförvaret användas till att kalibrera nätverket. Dessa data kommer också att utgöra underlag för en etappvis utbyggnad av nätverket med flera stationer.
- Analys av data som registrerats med det lokala seismiska nätverket och beräkning av fokal-mekanismer som stöd för modeller över spänningsfältet och strukturgeologin i Forsmark, kommer att genomföras regelbundet.
- Uppdatering av magnitud-frekvenssamband samt sannolikhetsberäkningar för jordskalv i Forsmark och Oskarshamn med nya jordskalvsdata som har tillkommit sedan de senaste beräkningarna (Böddvarsson et al. 2006).

11.3.2 Undersökningar av paleoseismicitet

I analysen för säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret utgår SKB från att jordskalv kan förekomma i samband med kommande glaciationer. De genomförda och planerade undersökningarna och modelleringarna av glacialt inducerade förkastningar ökar förståelsen för de mekanismer som orsakat observerad paleoseismicitet samt för sambandet mellan glacialt inducerade förkastningar och nutida seismicitet. Bland annat är det viktigt att förstå hur många och hur stora jordskalv som kan förekomma inom en glacial cykel, då detta har implikationer för beräkningen av kritiska radier (SKB TR-11-01).

Nuläge

Under de senaste tre åren har undersökningarna fortsatt kring den glacialt inducerade Burträsk-förkastningen i Sveriges mest seismiskt aktiva område (figur 11-2b). Bland annat analyserades den befintliga reflektionsseismiska profilen över förkastningen på nytt och passiva seismiska metoder testats för att få en tydligare bild av förkastningen (Beckel och Juhlin 2019, Beckel et al. 2022) och för att förbättra lokaliseringen av jordskalven kring förkastningsplanet.

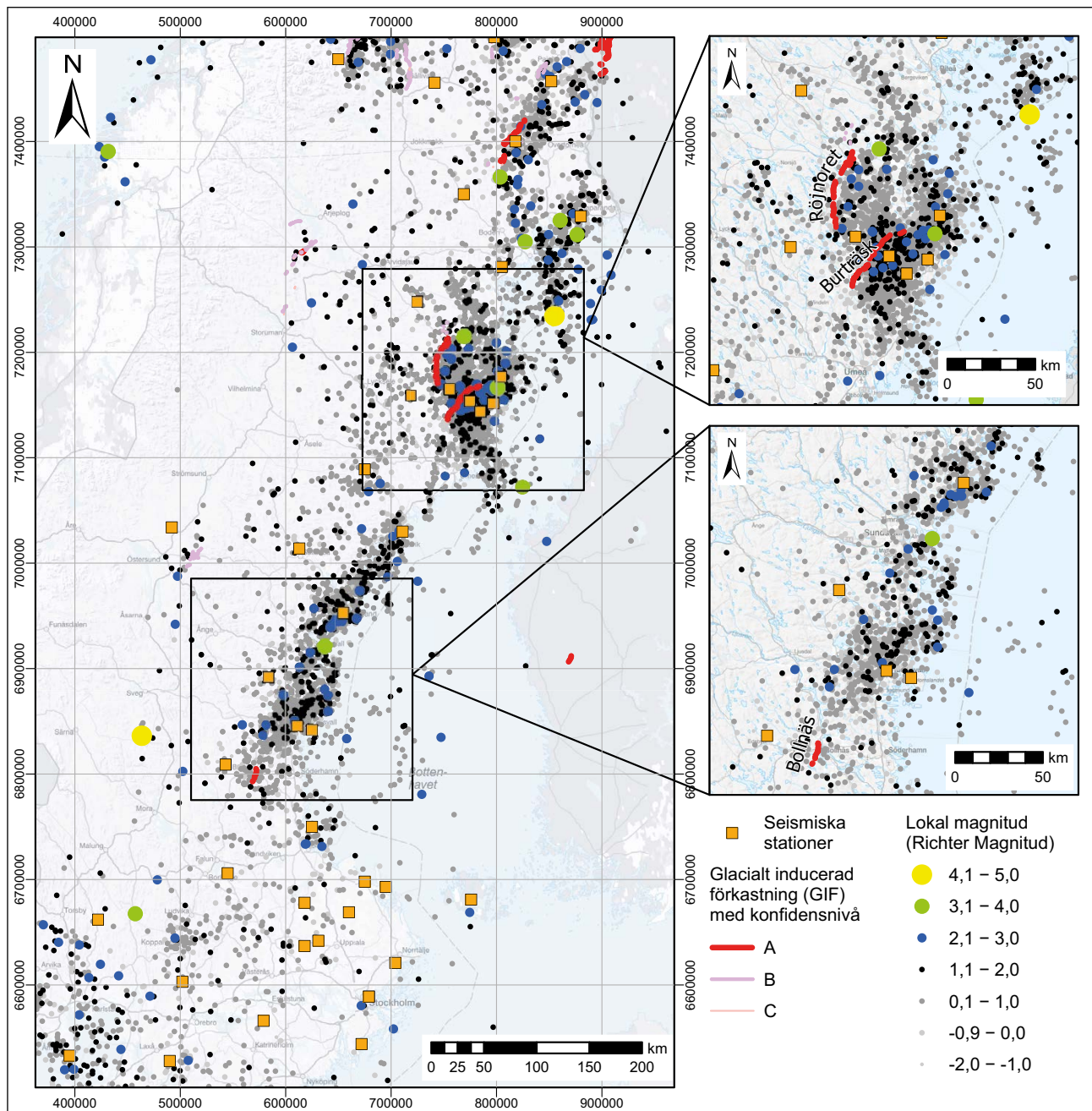
Ett projekt har initierats som syftar till att öka förståelse för de mekanismer som bidrog till och triggade de stora glacialt inducerade skalven i norra Skandinavien. Högupplösta seismiska data från området kring Burträskförkastningen (Lund et al. 2016) används som grund för att konstruera ett platsspecifikt bakgrundsspänningsfält som kan appliceras i numerisk modellering av förkastningsrörelsen. Genom simulering av glacialt inducerade förkastningsrörelser vid olika modellantaganden (exempelvis variationer av materialegenskaper, spänningar, portryck och position av hypocentrum på förkastningen) och jämförelser med observationer av förkastningsrörelser på markytan från Burträskområdet, är målsättningen att undersöka vilka parametrar som främst inverkar på förkastningens stabilitet och rörelse. Med hjälp av en LiDAR-baserad höjdmodell har en profil av det vertikala rörelsebeloppet längs hela förkastningsbranten beräknats. Rapportering av Burträskprojektet pågår.

Eftersom Öhrling et al. (2018) i sin analys av en högupplöst LiDAR-baserad höjdmodell över Uppland identifierade två linjära landformer som inte definitivt kunde avfärdas som glacialt inducerade förkastningsbranter, har under sommaren 2019 båda lokalerna undersökts vid en inledande fältkontroll. Den ena lokalen som bedömdes vara representativ för båda valdes ut för detaljerade fältstudier. Under hösten 2019 genomfördes en strategiskt lokaliserad grävning tvärs över branten, och schaktets norra vägg karterades. Fältundersökningarnas resultat visade att det kan uteslutas att den undersökta landformen orsakats av en seismisk händelse. Branten tolkas istället som kanten av en drumlin som förstärkts av subglacialt smältvatten. Resultaten rapporterades i Öhrling och Smith (2020).

Registreringar av SNSN visar ett mycket distinkt, nordostligt strykande kluster av skalv nordväst om Iggesund (figur 11-2c). Då en klar korrelation mellan nutida seismicitet och glacialt inducerade förkastningar har kunnat påvisas för merparten av de hittills registrerade förkastningarna (Lindblom et al. 2015) är detta kluster en stark indikation på att det kan finnas en hittills oupptäckt, glacialt inducerad förkastning i Iggesundsområdet. Den relativa närheten till Forsmark gör det särskilt angeläget att dessa indikationer undersöks närmare. Därför har SKB initierat ett projekt med avsikt att identifiera källan till det seismiskt aktiva stråket. Projektet är ett samarbete mellan Uppsala universitet och SGU. Ett tätt nätverk av 13 temporära seismiska stationer har upprättats under 2021, och dessa ska mäta i minst tre år med syftet att öka precisionen i jordskalvslokaliseringarna och därmed möjliggöra en identifiering av de strukturer som i dagsläget är seismiskt aktiva. Under 2021 analyserades även SGU:s befintliga geofysiska potentialfältsdata, och en lineamentstolkning av befintliga flygmagnetiska data genomfördes. Även ett antal strukturgeologiska fältundersökningar genomfördes som bland annat resulterade i en paleospänningsanalys.

SGU:s berggrundskartor i Iggesundsområdet som togs fram under åren 1987–2008 hade stora skillnader när det gäller observationstäthet och skala, vilket medförde påtagliga kvalitetsvariationer och så kallade ”kartbladsförkastningar”. Därför har SGU:s berggrundskartor i Iggesundsområdet nu harmoniserats geometriskt och semantiskt, det vill säga färger, geometri och benämning av olika berggrundsenheter och deformationszoner har uppdaterats och synkats mellan de olika kartbladen, baserat på geofysiska data, fältkontroll och geologisk erfarenhet. Med hjälp av en LiDAR-baserad, högupplöst höjdmodell och dess olika derivat, har även en studie genomförts för att identifiera linjära landformer som potentiellt skulle kunna utgöra glacialt inducerade förkastningar i Iggesundsområdet. Interimsrapportering av dessa arbeten pågår.

Resultaten från de kvartärgeologiska fältundersökningar som utfördes under 2021 har, tillsammans med en detaljerad litteraturstudie, använts för att klarlägga en paleoseismologisk fråga kring erosionsytors längs Upplandskusten, i Stockholmsområdet och upp till Iggesundsområdet (bland annat McCalpin 2013). Detta för att avgöra om erosionsytorna orsakades av en paleotsunami (Mörner et al. 2000) eller av andra erosionsprocesser som till exempel starka, kustnära bottenströmningar i det forntida havet (Lagerbäck et al. 2005). Studien visar att det inte finns några bevis för att erosionsytorna har skapats av en paleotsunami.



Figur 11-2. a) Kluster av skalv registrerade av SNSN i b) i anslutning till Burträskförkastningen och c) nordväst om Iggesund. Spår av glacialt inducerade förkastningar (röda linjer) från "International Database of Glacially Induced Faults" (Munier et al. 2020, se även Steffen et al. 2021).

Program

- Sammanställning och publicering av resultaten från jordskalvsanalyser och numerisk modellering av Burträskförkastningen.
- Fortsatta undersökningar i Iggesundsområdet för att identifiera källan till observerad seismicitet. Undersökningarna planeras inkludera seismisk övervakning och analys, Voxel-modellering baserad på flygmagnetiska data från SGU som underlag till den strukturgeologiska modellen, 3D-strukturgeologisk modellering över undersökningsområdet, och eventuellt grävning tvärs över ett antal strategiskt utvalda linjära landformer som inte kan avfärdas som glacialt inducerade förkastningar.

- Publicering av studien kring erosionsytor i de östra delarna av Mellansverige i en vetenskaplig tidskrift.
- Omvärldsbevakning och vid behov nya undersökningar kring utvecklingen av seismicitet och glacialt inducerade förkastningar under en glacial cykel (Ojala et al. 2019, Smith et al. 2021) och kring mycket unga seismiska händelser i till exempel Norge (Olesen et al. 2021).

11.3.3 Modellering av seismisk påverkan på Kärnbränsleförvaret

Eftersom det fortfarande finns stora osäkerheter vad gäller frekvens-magnitudsbandet för såväl nutida som glacialt inducerad seismisk aktivitet, är det svårt att genomföra en invändningsfri probabilistisk analys av jordskalvsrisken (PSHA). I bedömningen av seismisk risk i SR-Site utvecklade SKB därför en deterministisk metod för jordskalvsmodellering som används för att beräkna så kallade kritiska radier av målsprickor inom förvaret. Dessa radier förändras beroende på parametrar som till exempel avstånd till en jordskalvshysande förkastning, jordskalvmagnitud och ”stress drop” (skillnaden mellan spänningen över en förkastning före och efter ett jordskalv). Kapselpositioner som skärs av målsprickor med mått som överskrider de kritiska radierna bör undvikas.

Analysen av skjuvlastfallen i SR-Site baserades avsiktligt på vad som bedömts vara konservativa eller mycket konservativa förhållanden och antaganden. Med ökad processförståelse, underbyggda av observationer, kan mer realistiska antaganden avsevärt reducera uppskattningen av inducerad skjuvning och därmed av långsiktig risk, och även erbjuda möjlighet att optimera förvarslayouten. Tidigare modeller har använt representativa randvillkor och egenskaper för förvarsvolymen, men inte fullt ut utforskat den effekt som naturlig variabilitet samt osäkerhet av dessa villkor och egenskaper kan ha på de beräknade skjuvbeloppen.

Nuläge

Utvecklingen inom modellering av seismisk påverkan på Kärnbränsleförvaret har sammanfattats i en rapport (Hökmark et al. 2019), där även modelleringsresultat från de senaste åren redovisas tillsammans med en lista över öppna frågor. Under den senaste Fud-perioden har insatserna inom området främst fokuserat på att reducera konservatismen inom jordskalvsmodelleringen. I ett pågående arbete som är i rapporteringsfasen sammanfattas resultaten från studier kring effekten av spänningsfältets variabilitet, i både riktning och magnitud, på beräknade sekundära skjuvbelopp samt kvantifiering av dessa effekter till storlek och plats. Genom modellering har även målsprickor med orienteringar som maximerar skjuvbeloppet i olika delar av förvarsvolymen undersöks. Vidare har rörelser på målsprickor nära (100–200 meter) och konnekterade till en förkastning modellerats. Dessutom har stabiliteten hos branta, lokala deformationszoner i Forsmark analyserats, inklusive randtöjningens (eng forebulge) effekt på förkastningsstabilitet. Modellering av co-seismiska rörelser hos målsprickor har genomförts även för jordskalv på branta förkastningar.

Rapportering av fördjupade studier av målsprickors konceptualisering (främst undulation) under statisk och dynamisk last pågår.

Det pågår även arbete när det gäller andra aspekter som berör jordskalvsmodelleringen på ett indirekt sätt. Bland annat har effekten av modellupplösning med hänsyn till målsprickornas diskretisering analyserats. Likaså har effekten av 2D-modellering på sprickstabilitet undersökts och dessutom har interaktionen mellan bentonit, kapsel och berg inkluderats i beräkningen av skjuvbelopp. Avrapportering av dessa arbeten pågår.

Program

- Utredning av hur alternativa kombinationer av jord- och glaciationsmodeller (med avseende på isens olika storlek, utbredning, uthållighet och dynamik) påverkar beräknade skjuvbelopp hos målsprickor, för att kontrollera om tidigare slutsatser håller.
- Tillämpning av en förfinad konceptualisering av förkastningarnas undulation och kanter på ett jordskalvsfall som är representativt för Forsmark.

- Utveckling och fördjupning av analysen av upprepade skalv och deras effekt på målsprickorna, för att utvärdera tidigare antaganden.
- Modellering av sekundära rörelser vid ett jordskalv på en flackt stupande förkastning under det planerade Kärnbränsleförvaret, för att undersöka om resultaten som presenterats för Olkiluoto (Fälth et al. 2019) även håller för Forsmark.
- Uppdatering av sannolikhetsberäkningar för kritiska kapselpositioner baserad på nya kritiska radier, som i sig baseras på resultaten av mera realistiska jordskalvsmodelleringar i Hökmark et al. (2019) och i pågående arbete.

11.4 Grundvattenflöde, grundvattenkemi och transport av lösta ämnen

11.4.1 Utveckling av beräkningsverktyg för grundvattenflöde och transport av lösta ämnen

Detta avsnitt beskriver forskningsprogrammet för utveckling och underhåll av beräkningsverktyg för grundvattenflöde och transport av lösta ämnen. Även stödjande projekt som bidrar med kunskap kring hydrogeologiska frågeställningar relevanta för beräkningsverktygens användande och utveckling, behandlas här.

SSM stödjer i sin granskning av Fud-program 2019 SKB:s inriktning att löpande underhålla och utveckla beräkningsverktygen för att inkludera nya forskningsframsteg. SSM uppmuntrade dock SKB att bedöma nyttan med ökad komplexitet i modellerna i förhållande till de konceptuella osäkerheter som föreligger när det gäller vattenflöde genom sprickigt berg. Vidare påpekade SSM att SKB behöver överväga att parallellt använda sig av förenklade modeller för att studera osäkerheter hos såväl koncept som parametrar, samt att också alternativa hydrogeologiska modeller, exempelvis alternativa geometrisk spricknätverksbeskrivningar, skulle kunna användas för att belysa kvarvarande osäkerheter.

Då explicita DFN-modeller kan användas direkt för beräkning av grundvattenflöde och transport, så beskrivs vissa projekt av relevans för detta avsnitt även i avsnitt 11.2.

Nuläge

Ett pågående arbete med att ta fram uppdaterad hydrogeologisk modelleringsmetodik syftar till att inkorporera den utveckling som skett inom området samt att göra metodiken kompatibel med den modelleringsmetodik som tagits fram för DFN-modellering (Selroos et al. 2022). Metodiken delas upp i två delar, en för platsmodellering och en för säkerhetsanalysens applikationer. Medan den förra är långt gången är den senare enbart påbörjad. Arbetet med att färdigställa den senare är pausat och kommer att återupptas i god tid innan resultat behöver vara framme.

När det gäller modellering av grundvattenflöde och transport av lösta ämnen (dock inte av radionuklider inom säkerhetsanalysmodellering) är SKB:s primära verktyg fortfarande DarcyTools och ConnectFlow. Medan DarcyTools är en kontinuum-modell (eng Equivalent Continuous Porous Medium – ECPM) kan ConnectFlow hantera både explicit DFN-representation och uppskalning till ett kontinuum (ECPM). För båda verktygen görs uppskalningen baserat på en underliggande DFN-modell. Att ha tillgång till två olika beräkningsverktyg samt att upprätthålla modelleringskompetens inom båda dessa ger redundans och minskar riskerna för störningar i pågående projekt. Vidare har de två verktygen delvis olika styrkor.

Båda verktygen kan hantera geokemiska reaktioner som möjliggör modellering av grundvattenkemin genom reaktiv transportmodellering. För ConnectFlow har ytterligare utveckling skett, så att nu även geokemiska reaktioner kan hanteras i den explicita DFN-modellen (Applegate et al. 2020). Resultaten här visar att en ECPM-modell kan vara konsistent med underliggande DFN-modell för att beskriva kopplad hydrogeokemisk modellering, men att detta kräver en fin numerisk upplösning som inte alltid är realistisk för modeller i platsskala.

Arbetet med hydrauliska acceptanskriterier för Kärnbränsleförvaret har fortsatt och en studie har publicerats som testat konceptet på Forsmarksmodellen som användes inom SR-Site (Appleyard 2021). Studien visar att konceptet kan vara användbart, det vill säga att ett gränssättande transmissivitetsvärde för ett pilothål till ett deponeringshål kan tas fram, och att detta gränssättande värde innebär att deponeringshål med egenskaper som kan vara ofördelaktiga för förvarets säkerhet efter förslutning till viss del kan undvikas. I en annan studie baserad på data från Onkalo i Finland (Hartley et al. 2021) visas dock att för att kriteriet ska kunna vara ännu skarpare kan det krävas ytterligare parametrar, till exempel avstånd till tunnelände. I denna studie används konditionerade modeller (det vill säga att karterade sprickors faktiska läge återskapas), och de visar att deponeringshål nära tunneländar har sämre datafångst av sprickor (generellt är konditionerade modeller dock inte ett krav för att kunna utveckla hydrauliska acceptanskriterier). Innan hydrauliska acceptanskriterier kan användas som ett praktiskt verktyg krävs ytterligare testning och utveckling. Arbetet med detta är pausat, men kommer att återupptas i god tid innan resultat behöver vara framme.

Generell utveckling av DarcyTools har fortsatt, med fokus på att integrera yhydrologiska processer i verktyget. Detta arbete pågår och har inte rapporterats ännu. Förbättring och testning av hur Q-ekvivalentkonceptet (för att beräkna närzonsutsläpp inom radionuklidtransport) implementeras i DarcyTools har genomförts. Även här återstår rapportering i publik rapport.

Utvecklingen av de hydrogeokemiska beräkningsverktygen Pflotran och iDP (DarcyTools–Pflotran) har fortsatt. Den öppna källkoden i Pflotran har vidareutvecklats för simulering av elektromigrationsprocesser i sprickigt media genom inkludering av Nernst-Planck ekvationen. Detta innebär att man vid geokemisk modellering kan inkludera multikomponenttransport av laddade specier, med inkludering av elektrostatiske interaktioner och anjonexklusion. Arbete pågår med att implementera en ostrukturerad grid i iDP för att kunna förfina upplösningen i valda delar. Verktygen har använts för framtagning av modell med mikrostrukturell matrisherogenitet (Trincherio et al. 2020b), för utvärdering av analytisk lösning för datering av grundvatten (Trincherio et al. 2019b), modellering av syrenedträngning och för att utvärdera vilken roll heterogenitet har (Trincherio et al. 2018, 2019a), se vidare beskrivningar under avsnitt 11.4.3. I Iraola et al. (2019) redogörs för den utveckling som har skett för att modellera ämnes-transport i ett biporöst medium (eng dual porosity medium). Vidare används iDP för att modellera heliumtransport, se avsnitt 11.4.2.

Ett doktorandprojekt om hydrologi och kopplade biogeokemiska processer har slutförts (Jutebring Sterte 2021). Arbetet använde hydrologiska och hydrogeologiska data från det väl undersökta och dokumenterade avrinningsområdet Krycklan och visade hur hydrologiska och hydrogeologiska processer i ett avrinningsområde påverkar och styr vattenkemin i avrinningen. Både vittringsprocesser, med påföljande transport av baskatjoner (Jutebring Sterte et al. 2021a), och transport av löst organiskt kol (DOC) i avrinningsområdet har studerats (Jutebring Sterte et al. 2022). Vittring är av speciellt intresse för säkerhet efter förslutning av Kärnbränsleförvaret, då dessa processer kan säkerställa att infiltrerande vatten i berggrunden har en tillräckligt hög jonstyrka för att inte äventyra bentonitens stabilitet.

Utvecklingen av verktyget Marfa, som används för modellering av radionuklidtransport i geosfären, fortsätter i samarbete med Posiva. Verktyget är nu allmänt tillgängligt genom att det har en öppen källkod. Ny funktionalitet har utvecklats för att hantera diffusion in i stagnant vatten i sprickplanet, med efterföljande matrisdiffusion (Trincherio et al. 2020a). Vidare har en utveckling för att integrera Marfa med DFN-modeller påbörjats, vilket syftar till att även kunna hantera transienta flödesförhållanden. Marfa har även använts för att studera hur mikrostrukturell matrisherogenitet kan skalas upp med användning av effektiva parametrar på större skala (Trincherio et al. 2020b). Ytterligare diskussion kring effekten av mikrostrukturell heterogenitet och hur den hanteras vid modellering av radionuklidtransport finns i avsnitt 11.4.3.

I en annan studie som fokuserat på utvärdering av spårämnesförsök i sprickigt berg har man uppskattat retentionsparametrar från genombrottskurvor, specifikt från genombrottskurvans maximivärde (Cvetkovic et al. 2020). Genom att kunna utnyttja max-genombrottet behövs inte informationen om genombrottskurvans svans, som man använt i tidigare studier. Det gör det praktiska genomförandet av denna typ av tester både enklare och billigare.

Program

Programpunkterna syftar till att säkerställa forsknings- och utvecklingsbehovet kring grundvattenflöde och transport av lösta ämnen för SKB:s existerande och planerade förvar.

- Fortsatt utveckling av beräkningsverktyget DarcyTools. Fokus kommer att ligga på integrering av ythydrologiska processer och på utveckling för beräkning av storheter som används i säkerhetsanalysberäkningar, såsom Q-ekvivalent flöde, transportmotstånd och advektiv gångtid. Uppskalningsstudier ska planeras för utvärdering om den rent geometriska uppskalning som används idag bör ersättas av flödesbaserad uppskalning.
- Fortsatt utveckling av ConnectFlow inom ramen för den internationella sammanslutningen iConnect Club, där för närvarande SKB samt Obayashi (Japan) ingår. Studier med reaktiv transportmodellering i explicita DFN-modeller fortsätter, specifikt studeras nedträngning av utspädda vatten med möjlig följande erosion av bentonit.
- Fortsatt utveckling av iDP med fokus på ostrukturerad grid för att kunna göra hydrogeokemiska modelleringar i stor skala med ökad grad av detaljering i områden där förfinade strukturer är av betydelse.
- Utveckling och underhåll av Marfa, beräkningsverktyget för radionuklidtransport, fortsätter tillsammans med Posiva. Fokus under Fud-perioden är att integrera Marfa med DFN- och grundvattenflödeskoder i en ny version som kallas Marfa-DFN.
- Ett projekt som är delfinansierat av BeFo, som handlar om hur öppna borrhål i sprickigt berg bör implementeras i numeriska grundvattenflödesmodeller, drivs under perioden 2021–2024.
- Inom SKB:s Task Force GWFTS pågår Task 10 som handlar om hydromekanisk koppling i enskilda sprickor och spricknätverk. Arbetet beskrivs i avsnitt 11.2. I Task 10 ingår även en del som på ett mer generellt plan handlar om validering av modeller.
- Ett projekt har initierats för att utvärdera nya modellverktyg för integrerad modellering av hydrogeologi och hydrogeokemi baserat på samma platsdata som användes i SR-Site (inför F-PSAR) och i PSAR, som en förberedelse inför säkerhetsredovisningen inför provdrift av Kärnbränsleförvaret. Projektet kommer i huvudsak att studera utvalda delar av säkerhetsanalysens referensutveckling och kommer även att tjäna som kompetensöverförande aktivitet inom områdena hydrogeologi, hydrogeokemi och säkerhetsanalysmetodik för Kärnbränsleförvaret.

11.4.2 Processer som påverkar den hydrokemiska miljön

Den hydrogeokemiska miljön i Kärnbränsleförvaret påverkas av ett antal olika processer, som kan ha betydelse för förvarets säkerhet efter förslutning, till exempel vittring och mikrobiell aktivitet. Både vittringsprocesser och mikrobiell sulfidbildning i geosfär såväl som i ingenjörbarriärerna, kan påverka förutsättningarna för korrosion av kopparkapseln. Frågor kopplade till dessa processer är därför fortsatt prioriterade.

Nuläge

Under den gångna Fud-perioden har studier av DOC i olika typer av grundvatten utförts. I en experimentell studie har biotillgängliga kolföreningar i grundvattnet på förvarsdjup på Äspö karakteriserats och kvantifierats (Osterholz et al. 2022). Slutsatser från denna studie är att det organiska materialet (DOM) som transporteras ned i den djupa kontinentala berggrunden huvudsakligen har terrestriskt ursprung. Den terrestra DOM-signaturen verkar vara bevarad och materialet är svårtillgängligt för nedbrytning, vilket lett till en mikrobiell population som livnär sig på en liten andel av lättillgängliga energikällor, såsom geogaser och nekromassa (döda celler), som återfinns i de äldsta salina vattnen. Detta stöder hypotesen att djupbiosfären är i metabolisk beredskap med extremt långa generationstider (Osterholz et al. 2022). Som fortsättning på denna studie har naturlig DOC från två av borrhålen på Äspö uppkoncentrerats och använts som substrat till sulfatreducerande bakterier (SRB) för att undersöka hur tillgängligt det är. En slutsats från denna studie är att DOC på förvarsdjup är svårtillgängligt och sannolikt inte kommer att kunna utnyttjas av mikrober för sulfidbildning i någon större utsträckning under förvarets livslängd. Rapportering av denna studie pågår.

Effekten av tillförel av acetat på mikrobiell uranreduktion har undersökts. I en studie tillsattes acetat och en blandning av kommersiella SRB-stammar till prover av djupt grundvatten med något förhöjda urankoncentrationer från Forsmark, med syftet att undersöka om bakterierna kan fälla ut uran då den enda tillgängliga kolkällan är acetat (Krall et al. 2020, Suksi et al. 2021). Efter en månads inkubation minskade urankoncentrationerna med cirka 50 procent i grundvattenprovet med tillsatt acetat och SRB. I kontrollprovet, som endast innehöll grundvatten med tillsatt acetat och SRB-medium (utan SRB), minskade urankoncentrationerna med över 95 procent. En järnsulfidfällning hittades i både experimentvattnet och kontrollvattnet. Fällningen i kontrollvattnet innehöll, enligt elementanalys gjord med svepelektronmikroskop utrustad med en energidispersiv röntgendetektor (SEM-EDX), både mikrober och uran. Försöket visar att acetat fäller ut uran och att närvaro av SRB med tillsatt acetat, minskar utfällning av uran. Rapportering av resultaten pågår.

Studier rörande svarta utfällningar som observerats i grundvattnet på flera ställen i Äspötunneln har avslutats. De svarta utfällningarna innehåller höga halter av mangan och i vattnet har man funnit mikrober som associeras med manganoxidation (Svensson et al. 2021). Studierna syftade främst till processförståelse av ett nytt fenomen som man observerat i samband med sprängning av en ny tunnel, och som potentiellt skulle kunna ha betydelse för förvaren. Manganoxider liksom järnoxider har potential att adsorbera radionuklider och skulle därför kunna vara positivt för säkerheten efter förslutning i Kärnbränsleförvaret. För närvarande bedöms dock betydelsen som försumbar.

Studier rörande matrisporvattnets kemiska sammansättning och isotopgeokemi har genomförts inom platsprogrammet för Forsmark. Data från lakningsexperiment kan användas till att verifiera diffusion i bergmatrisen, men även för att underbygga grundvattnets paleohydrogeologiska utveckling. Studier med lakning av neutronaktiverade bergprover har genomförts på Helsingfors universitet. Resultat från dessa indikerar möjligheten att utveckla indirekta metoder som skulle kunna ge ytterligare information om saltkoncentrationen i matrisporvattnet. Kompletterande analyser av mineralogin har genomförts och kommer att rapporteras tillsammans med experimentdata för anjoner och för de viktigaste katjonerna i matrisporvatten.

Modelleringsresultat indikerar att förekomst av järn(II) motverkar syre- och sulfidnedträngning i bergmatrisen (avsnitt 11.4.3). För att undersöka tillgänglighet av järn(II) har SKB tillsammans med forskare på Chalmers och Linnéuniversitetet genomfört anaeroba lakningsförsök med biotit i olika vattentyper, inklusive sura och cirkumneutrala vatten, med och utan tillsatt kalium, magnesium och andra huvudelement i biotit. Även om det antogs att dessa tillsatser skulle hämma biotitupplösning, kunde järn(II) observeras i samtliga vittringslösningar. Varken mikroskopisk undersökning av biotit eller Mössbauerspektroskopi och röntgendiffraktion tyder på någon signifikant förändring av mineralet. Rapportering av dessa försök pågår. Ett försök pågår med att mäta stabila järnisotoper i grundvatten från Forsmark i syfte att fastställa järnets ursprung.

I samarbetsprojektet med Posiva, Integrated Sulfide Project (ISP), samlades samtliga aktiviteter som syftade till att undersöka processer som kan påverka förekomst och koncentrationer av sulfid på förvaringsdjup (Posiva SKB 2021). Efter projektets avslut initierades Sulfide Information Exchange Project (SIEP) som är ett fyraårigt informationsutbytesprojekt med Posiva för att samla kvarstående frågor rörande sulfid i Kärnbränsleförvaret i såväl geosfären (se aktiviteter rörande DOC, järn(II) och effekt av tillfört acetat på mikrobiell reduktion av uran ovan, och aktiviteter som rör sulfat i buffert och återfyllning (beskrivet i avsnitt 10.3.2)). Projektet är nu drygt halvvägs och 1,5 år återstår.

I det tidigare GAP-projektet som bedrevs mellan 2008 och 2013, togs grundvattenprover bland annat från borrhålet DH-GAP04 som går in under isen och sträcker sig ner till förvaringsdjup. Dessa prover var dock av dålig kvalitet, då de innehöll höga halter av spolvatten. Under hösten 2022 genomfördes en ny provtagning av grundvatten i det aktuella borrhålet.

Under den gångna Fud-perioden har datorprogrammen Pflotran och DarcyTools utvecklats för att kunna modellera utdiffusion av löst helium från bergmatrisen in i grundvattenflödande sprickor. Det slutliga målet har varit att kunna stödja slutsatser om dateringen av djupa grundvatten och preliminära resultat publicerades i Trincherio et al. (2019b). Detaljer kring andra utvecklingsarbeten av beräkningsverktyg för grundvattenflöde och transport av lösta ämnen ges i avsnitt 11.4.1.

En dialog med olika universitet har inletts om studier av geokemiska processer i ytliga lager i Forsmark, och en preliminär modelleringsstudie rörande kalcit har genomförts. Potentiellt kan urlakning av katjoner från jordlagren ha positiv inverkan på jonstyrkan på de utspädda vattnen som passerar genom dem, innan de slutligen når förvarsdjup och därmed minskar risken för bufferterosion.

Program

- Förstudie rörande acetogener och metanogener på förvarsdjup med syftet att bedöma heterotrofa respektive autotrofa processers betydelse för omsättning av gaser och organisk kol såsom acetat.
- Fortsatta studier rörande effekten av tillförsel av acetat på mikrobiell sulfat- och uranreduktion.
- Studier av matrisporvatten, kemisk sammansättning och isotopgeokemi fortsätter. Kompletterande analyser av bland annat klor-36 behövs för att utröna de olika källor till salinitet som kan finnas, jämförande diffusionsberäkningar och vidare utveckling av dessa mer indirekta metoder för analys av matrisporvatten.
- Vattenprover från borrhålet DH-GAP04 på Grönland kommer att analyseras och resultaten publiceras.
- Resultaten från utvecklingen av beräkningsverktyg för att modellera heliumflöde och därmed stödjande datering av djupa grundvatten publiceras under perioden.
- Modellutveckling för att beskriva sulfidomsättningen i berget, det vill säga både sulfatreduktion, lakning av järn (II) från mineral samt utfällning av järnsulfid, planeras.
- Studier av geokemiska processer i ytliga lager i Forsmark kommer att fortsätta för att skapa en tydligare bild av hur vittringsprocesser påverkar vattenkemin runt Kärnbränsleförvaret och SFR.

11.4.3 Transportegenskaper och processer som påverkar ämnestransport i berget

Detta avsnitt beskriver forskningsprogrammet för förståelse och kvantifiering av processer som påverkar ämnestransport i berget.

SSM påpekade i sin granskning av Fud-program 2019 avseende sorption att det är angeläget att sorptionsdatabaser hålls uppdaterade, att viss egen experimentell verksamhet upprätthålls långsiktigt, och att kunskapsutvecklingen inom termodynamiska sorptionsmodeller bevakas. Inom diffusionsområdet uttryckte SSM att de planerade insatserna kring genomförande, tolkning och modellering är något oklara och att planer för verifierande fältexperiment bör tas fram.

Nuläge

Arbete pågår med att ta fram en uppdaterad metodik för transportmodellering för både plats-beskrivande modellering och säkerhetsanalys. Första steget har varit att sammanställa ny utveckling inom retardationsmodellering samt att undersöka olika koncept med transportklasser för att bättre beskriva geospatuell fördelning i retardationsmodeller. I samband med detta har behov identifierats för fortsatta experimentella studier och metodutveckling. Metodiken innefattar tre olika ben, tolkning och utvärdering av data, extrapolering till säkerhetsanalys samt verifiering/konsistenskontroll med exempelvis naturliga analoger. Via storskalig transportmodellering med en trelagermatris (sprick-mineral, omvandlingszon och underliggande ostört berg) studerade Crawford och Löfgren (2019) hur inverkan från den rumsliga variabiliteten hos olika lager minskar vid transport utmed hela flödesvägen. De visade att sprickmineralbeläggningar har begränsad påverkan på diffusivt utbyte och retardation, men att omvandlingszonen är av intresse för retardationen. Detta, tillsammans med redan tillgängliga data från platsundersökningar, underbygger ett ökat fokus mot omvandlingszonen i kommande laboratorie- och fältprogram.

Retardationsprocesser, styrande mikrostrukturer i bergmatrisen och uppskalning har varit i fokus i det internationella forskningsprogrammet Task Force GWFTS, Task 9 "Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD", vilket nu är

avslutat. Programmet har innefattat tolkning och realistisk modellering av demonstrationsförsöken WPDE (Poteri et al. 2018a, b) och TDE inom Posivas program REPRO i Onkalo, samt av SKB:s tidigare försök LTDE-SD i Äspölaboratoriet. Dessa försök har innefattat spårämnesexperiment från eller mellan borrhål i tunnelmiljö, med målsättningen att demonstrera matrisdiffusion och sorption i fält. En grundtanke i Task 9 har varit att bygga konceptuell förståelse för experimenten, bergmatrisen och processerna som manifesteras i resultaten, innan modellering startats. Programmet har resulterat i ett stort antal vetenskapliga artiklar och rapporter där heterogenitet ofta har varit i fokus (Soler et al. 2021a, b, c, 2022, Crawford et al. 2022, Tachi et al. 2021, Trincherio et al. 2017, Trincherio et al. 2020c, Kekäläinen 2021, Kröhn 2020, Meng et al. 2020, Park och Ji 2018, 2020, Svensson 2020, Svensson et al. 2018, 2019a, b, Iraola et al. 2017) och en avhandling (Meng 2020). Detta har bland annat resulterat i en mikro-DFN-modell av porsystemet i bergmatrisen och användandet av mikrotomografi för att bättre modellera matrisens mikrostrukturer. Genom Task 9 har man nu tillgång till verktyg som kan hantera både den kemiska och fysiska variabiliteten i matrisen och metoder för att skala upp modellerna till skalor som är relevanta för säkerhetsanalysen. I tillägg har dessa demonstrationsförsök utvärderats utifrån en metodologisk synvinkel (Löfgren och Nilsson 2019, 2020, Andersson et al. 2020), vilket är värdefullt vid inledande planering inför motsvarande demonstrationsförsök i Kärnbränsleförvaret.

Utöver Task 9 har matrisdiffusionsstudier handlat om processförståelse, förbättrad modellering på centimeter- till decimeter-skalan och provtagningsmetodik vid platsundersökningar. Detta har lett till ökad processförståelsen om elektrostatiske interaktioner mellan negativt laddade mineraler och lösta joner i porvattnet, vilket tydliggjort behovet att bättre karakterisera mycket småskaliga strukturer i matrisen (ner till nanometerskala). Viktiga karakteristika är diffusionstillgänglig porositet, apertur-distributionen samt porväggarnas ytelektrostatiske egenskaper. Jontransport och elektrostatiske interaktioner i berg har modellerats i tre parallella projekt. Dels har beräkningsverktyget Pflotran utvecklats så att det inkluderar Nernst-Plancks ekvation och där elektrostatiske interaktioner med porväggen hanteras via en Donnan-ansats (Trincherio et al. 2022). Det möjliggör mer realistisk geokemisk transportmodellering av ett multikomponentsystem under transienter, där olika joner har olika migrationshastigheter. Liknande modellutveckling har även gjorts med beräkningsverktyget Comsol Multiphysics för att kunna modellera så kallade elektromigrationsförsök, vilket innebär spårämnesförsök under ett elektriskt fält. Här har elektrostatiske interaktioner med porväggen hanterats via sorptionsisotermer samt Poisson-Boltzmanns, Grahames och Smoluchowskis ekvationer. Elektromigrationsförsök har även utförts av Li X et al. (2020) och modellerats av Meng et al. (2020) via en Nernst-Planck-ansats. Dessa insatser har lett till ett ökat fokus på kvantifiering av extrapolationsfaktorer från retardationsdata som erhålls i laboratoriet till förvarsförhållanden i kommande program. Detta gäller in situ-last, porvattenkemi, och provstorlek/krosstorlek. De genomförda studierna pekar även på behovet att verifiera extrapolationsfaktorerna via spårämnesförsök i förvarsberget.

Utöver Task 9 har sorptionstudier fokuserat på fördjupad processförståelse kopplat till platsspecifika egenskaper och extrapolation till förvarsförhållanden. SKB och Posiva finansierar ett doktorandprojekt inom EU-programmet Eurad med fokus på studier av radiumsorption med olika metoder på platsspecifikt material från Forsmark. Projektet syftar till att öka processförståelsen för radiumsorption och koppla den till platsspecifika bergegenskaper och mineralogi. Ett arbete pågår med en uppdaterad metodik för tolkning av mätdata från krossat material till sorptionskoefficienter, K_d . Denna metodik innefattar extrapolation från laboratorium till förvarsförhållanden samt framtagning av K_d för varierande förhållanden avseende både mineralogi och vattenkemi. Den senare delen bygger på ett dynamiskt K_d , även kallat smart- K_d , ett koncept i vilket termodynamiska modeller används för att ta fram uppsättningar av K_d -värden för varierande förhållanden, med utgångspunkt i experimentellt uppmätta fördelningar och vid behov analogier. Vidare har metodutveckling avseende sorption påbörjats med fokus på desorption. En sammanställning av termodynamiska beräkningar för att bestämma storleksordning av sorption på korrosionsprodukter med utgångspunkt från SFL har tagits fram. Arbetet pågår med att beräkna bildningen av korrosionsprodukter för att bedöma hur stor påverkan av sorption på dessa kan vara relativt sorption på cement.

Reaktiv transportmodellering med iDP har använts för att studera syrenedträngning från glaciala smältvatten (Trincherio et al. 2019a). Studien har undersökt hur en heterogen fördelning av geokemiskt reaktiva mineral i berget påverkar syrenedträngningen, samt vilken buffertkapacitet det granitiska berget har. Detta har gjorts med en mikro-DFN-modell i DarcyTools och Pflotran. Modellen inkluderar upplösning av biotit med påföljande reduktion av syre från frigjort järn(II).

Resultaten indikerar att syre transporteras djupare in i matrisen jämfört med tidigare modellering av en enskild flödesväg i homogent berg. Detta indikerar en ännu mer begränsad syrenedträngning från glaciala smältvatten.

Modellutveckling har skett för tolkning av utdiffusion av naturligt förekommande nuklider från matris till vattenförande sprickor, för att utvinna mer information och förankra matrisdiffusion från naturliga analogier (Trincherio och Iraola 2020).

Program

Punkterna nedan utgör program för att säkerställa forskning och utvecklingsbehov kring transport av lösta ämnen för SKB:s existerande och planerade förvar. Arbetet planeras att bedrivas iterativt med metodutveckling, prediktiva modelleringar, experimentella undersökningar och tolkning och utvärdering av resultat, med det övergripande syftet att fördjupa underlaget till platsbeskrivande modellering och analys av säkerhet efter förslutning.

- Fortsatt framtagning av metodik för transportmodellering med fokus på tydliggörande av strategier för modellering och genomgång av beräkningskoder.
- Framtagande av ett undersökningsprogram med fokus på bergvolymerna runt SFR och Kärnbränsleförvaret.
- Metodutveckling och anpassning av laboratorie- och fältundersökningar gällande:
 - Diffusionsmetoder med dosrelevanta eller geokemiskt viktiga anjoner och svagsorberande katjoner, under olika saliniteter och laster.
 - Elektromigrationsmetoder och elektriska metoder i laboratoriet och från borrhål i förvarsvolymen, för kvantifiering av migrationsdata och ledningsförmåga av jordströmmar.
 - Sorptions- och desorptionsmetoder på krossat och monolitiskt berg samt på spricktytor, för olika dosrelevanta spårämnen vid olika vattensammansättningar.
 - Karakteriseringsmetoder för spricknära berg gällande katjonbyteskapacitet, specifik yta, mineralogi, aperturdistribution, porositetsdistribution och elektrostatiska ytegenskaper.

För att kvantifiera korrelationer mellan retentionsparametrar och bättre förstå kopplade processer, kommer flertalet metoder appliceras på ett fåtal prov. Målet är att hantera den rumsliga variabiliteten för svårsmätbara parametrar genom korrelationer till parametrar som är relativt enkla att mäta eller observera på en stor mängd platser i förvarsberget.

- Framtagning av verktyg för småskalig modellering av diffusion som på ett mer realistiskt sätt kan hantera jonmigration och även representera en heterogen bergmatris.
- Vidareutveckling av termodynamiska sorptionsmodeller i konceptet med smart- K_d , med syftet att öka processförståelsen, komplettera underlag till sorptionsdatabaser och utveckla modeller för framtagning av K_d för varierande förhållanden (vattenkemi, pH, redox och mineralogi). Arbetet kommer även att innefatta experimentella undersökningar.
- Fortsatta studier av sorption och matrisdiffusion i naturliga system för konsistenskontroll och som ett komplement till de planerade verifierande demonstrationsförsöken.
- Påbörjande av en konceptstudie för att ta fram möjliga alternativ till framtida, verifierande demonstrationsförsök av diffusion och sorption med hjälp av spårämnesförsök i Kärnbränsleförvarets förvarsberg.

11.4.4 Klimatets inverkan på processer i geosfären

Nuläge

En sista delstudie inom den hydrogeologiska modellering som genomfördes som del av GAP-projektet har publicerats (Jaquet et al. 2019). I denna delstudie har transienta simuleringar över en glaciationscykel genomförts för GAP-platsen på Grönland. Resultaten visar att stor omsorg måste utövas då subglaciala randvillkor väljs för de olika faserna under en glaciationscykel, specifikt kan valet av ett tryckrandvillkor motsvarande isens mäktighet överskatta infiltrationen under vissa förhållanden.

SKB finansierar ett doktorandprojekt inom området glacial och periglacial hydrologi. Det utförs på Köpenhamns universitet och är en del av nätverket CatchNet som SKB initierat tillsammans med andra kärnavfallsorganisationer samt akademiska partners. Syftet med doktorandprojektet är att utnyttja data från de tidigare GAP- och Grasp-projekten (det senare står för Greenland Analogue Surface Project) för att öka kunskapen och förståelsen av kopplingen mellan de glaciala och periglaciala systemen, specifikt var och hur utströmning sker i så kallade taliks, det vill säga ofrusna delar av den i övrigt kontinuerliga permafrosten. Två vetenskapliga artiklar har publicerats, den första visar på hur permafrostens tillväxt (eng permafrost aggradation) påverkar utströmning av grundvatten på ytan (Hornum et al. 2020). Den andra artikeln visar hur glacialt inducerade sprickor i sedimenten närmast ytan påverkar utströmning i en så kallad pingo (Hornum et al. 2021). En pingo är ett fenomen där grundvattenutströmning skapar en upphöjning i permafrosten. Under den gångna Fud-perioden har också monitorering av GAP- och Grasp-platserna fortsatt.

Program

- Doktorandprojektet inom glacial och periglacial hydrologi fortsätter och kommer att avslutas under 2023. Ytterligare två till tre artiklar planeras. Ett av dessa arbeten bygger vidare på den första studien (Hornum et al. 2020), men inkorporerar kopplade hydro-termiska processer. Ytterligare en studie ska fokusera på användning av geokemiska data för att studera utströmning av djupt grundvatten och det sista planerade arbetet är en modelleringsstudie, som kommer att fokusera på hur det djupa och ytliga grundvattnet interagerar på den undersökta platsen på Grönland.

12 Ytekosystem

SKB:s forskningsprogram för ytekosystem syftar i första hand till att skapa underlag för beräkningar av potentiell radioaktiv dos till människor och miljön i analysen av slutförvarens säkerhet efter förslutning. Data och kunskap som tas fram inom programmet ger också underlag för miljöbedömningar, miljöövervakning och för analysen av säkerheten i anläggningar i drift. De aktuella forskningsfrågorna för de tre förvarerna SFR, Kärnbränsleförvaret och SFL överlappar till stor del varandra inom området ytekosystem.

Den metodik och de modeller och data som SKB använder för att representera biosfären i analyser av förvarens säkerhet efter förslutning har utvecklats under flera decennier. Vid granskningen av säkerhetsvärderingen för SFL, SE-SFL (SKB TR-19-01), uttryckte sig SSM generellt positivt kring arbetet med biosfären. Man lyfte att arbetet är innehållsrikt, och uppskattar att redovisningen ger en möjlighet för SSM att ta del av hur långt SKB kommit i arbetet med att utveckla metodik och modeller (SSM 2021c). Det finns dock ett antal frågor som kräver vidare insatser, antingen för att det har framkommit i myndigheternas kommentarer vid granskningar av inlämnade ansökningar, eller för att SKB har bedömt att insatser krävs för att minska osäkerheter i kommande säkerhetsanalyser. De viktigaste kvarstående frågorna inom ytekosystem finns inom fyra olika områden:

- Upptagsvägar och upptagsmekanismer för olika organismer.
- Temporal och spatial heterogenitet i landskapet.
- Transport- och ackumulationsprocesser.
- Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper för viktiga ämnen i förvarerna.

En tidig översikt av SKB:s arbete inom ämnesområdet återfinns i det specialnummer av *Ambio* som publicerades 2013 (Kautsky et al. 2013). I arbetet med den senaste analysen av säkerhet efter förslutning för SFR, SR-PSU, har SKB publicerat rapporter som redovisar 1) antaganden i modelleringen av de yttnära ekosystemen (SKB R-14-02), 2) data och modeller som använts för dosberäkningarna (Grolander 2013, Saetre et al. 2013, Tröjbom et al. 2013) och 3) tillämpningen av de använda modellerna i säkerhetsanalysen (SKB TR-14-06). I SE-SFL gjordes flera ansatser för att minska osäkerheter i analysen och för att bemöta svagheter som påtalats i granskningar av säkerhetsanalyserna SR-Site och SR-PSU. Dessa ansatser redovisas nedan och i underlagsrapporterna till SE-SFL (Grolander och Jaeschke 2019, SKB TR-19-05). Vid granskningen av SE-SFL har ytterligare synpunkter framförts, vilka delvis har arbetats in i den kommande analysen av säkerhet efter förslutning som ingår i PSAR inför utbyggnaden av SFR. Övriga aktiviteter som SKB planerar att genomföra med anledning av dessa granskningskommentarer beskrivs nedan.

Granskningskommentarer från SSM, Kärnavfallsrådet, Kungliga Vetenskapsakademien och Stockholms universitet på Fud-program 2019 bekräftar att de insatser som gjorts och planeras är ändamålsenliga, relevanta och har god vetenskaplig kvalitet. SKB strävar även fortsatt efter att upprätthålla en hög kvalitet. En viktig del för att uppfylla detta är samarbeten med olika forskargrupper, både nationellt och internationellt. På det nationella planet samarbetar SKB till exempel med grupper som arbetar i Krycklan och Skogaryd, platser som ingår i Vetenskapsrådets nationella nätverk Sites (<http://www.fieldsites.se>). Internationellt medverkar SKB i flera olika nätverk, till exempel IAEA Mereia och Bioprota (<http://www.bioprota.org/>).

I detta kapitel redovisas kort de frågor inom ytekosystem som bedöms vara viktigast under Fud-perioden samt kortfattat vilka planer SKB har för att arbeta med dessa frågor.

12.1 Upptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider hos olika organismer

För människan utgörs en viktig exponeringsväg för radionuklider från ett slutförvar av intag via mat och dryck, och exponering via födan dominerar dosen från många radionuklider. Upptaget av radionuklider i organismer är oftast avgörande för hur stort dosbidraget blir till både människor och biota.

Nuläge

Frågor kring upptagsvägar och upptagsmekanismer för radionuklider innefattar både enskilda organismer och de ekosystem som organismerna ingår i. Vid dosberäkningar används traditionellt koncentrationsfaktorer (CR), vilka beskriver koncentrationen av ett ämne i organismen jämfört med den i födan eller i omgivande media (vatten, jord eller sediment). SKB har tidigare genomfört mätningar för ett stort antal element i relevanta ekosystem, men det finns ett behov av att utöka mätningarna med parade växt- och markprover från vissa ekosystem.

De empiriskt bestämda CR-värdena är behäftade med osäkerheter och SKB har därför arbetat långsiktigt med att utveckla alternativa metoder för att uppskatta radionuklidupptag i organismer (till exempel Kumblad och Kautsky 2004, Konovalenko 2012). Exempelvis har SKB i tidigare säkerhetsanalyser baserat kolupptag i växter och djur på den specifika aktiviteten av oorganiskt kol, det vill säga aktiviteten relativt det stabila ämnet. I SR-PSU antogs upptaget av klor i växter vara begränsat av växtens näringsbehov, och i SE-SFL använde SKB en modell för ett reglerat upptag även för två andra växtnäringsämnen (kalium och kalcium).

För de flesta större djur är upptaget av radionuklider främst kopplat till födointag och därför har SKB:s arbete fokuserat på att beskriva näringskedjor. Initialt sker upptaget i näringskedjan via växter och är alltså kopplat till systemets primärproduktion. SKB:s tidigare arbete kring upptagsmekanismer för akvatiska och terrestra system har beskrivits i ekosystemböckerna (Andersson 2010, Aquilonius 2010, Löfgren 2010), där beskrivningarna till stor del baserats på data från SKB:s platsundersökningar.

Under 2020 inledde SKB odlingsförsök av olika jordbruksprodukter på olika marktyper vid Byle gård i Uppland. Byle gård utgör en naturlig analog till ett framtida Forsmark om cirka 3 000 år, där en sjö har dikats ut och odling sker på de delvis kalkrika jordarterna. I dessa försök jämförs det naturliga upptaget av element i olika växter med innehållet i marken. Det finns även möjlighet att koppla upptaget av olika ämnen till evapotranspiration och primärproduktion. Syftet med studien är att komplettera databasen med platsspecifika data för jordbruksmark, men också att öka förståelsen för processer som påverkar omsättning och upptag av radionuklider i ett framtida Forsmark.

SKB är delaktigt i ett projekt vid SLU i Umeå som benämns Kronosekvensprojektet och som omfattar provtagning av mark- och växtkoncentrationer av olika ämnen i ett 40-tal myrar av olika ålder i Norrland. Projektet har gett upphov till flertalet publicerade arbeten som analyserar tungmetallers beteende beroende på myrars ålder och biogeokemiska egenskaper (Wang et al. 2020, 2021). Vidare samarbetar SKB i ett doktorandprojekt, där elementsammansättningen i växter och mark i myrar av olika ålder och med olika egenskaper i projektet studeras. Resultaten förväntas öka förståelsen av hur förutsättningarna för växtupptag påverkas av miljön och förändras med tiden i ett framtida Forsmark.

Data från odlingsförsöket och Kronosekvensprojektet ger underlag för utveckling av processororienterade upptagsmodeller för element som tas upp aktivt (exempelvis närsaltsliknande ämnen) respektive passivt (exempelvis med vatten). En distinktion mellan aktivt och passivt upptag kan underlätta beräkningarna av upptag under förändrade klimat- och/eller markförhållanden som påverkar växters vattenupptag.

Rinnande vatten liknar på många sätt sjöekosystemen, men skillnader som finns när det gäller till exempel hydrologin, förutsättningar för kemisk utfällning av olika ämnen (avsnitt 12.4), och de biologiska upptagsmekanismerna kan ge andra förutsättningar för ackumulation av radionuklider. Tidigare forskning indikerar att vissa radionuklider kan ackumuleras nära rinnande vatten (Lidman et al. 2017, Ledesma et al. 2018). Ett doktorandarbete finansierat av SKB har simulerat transport av olika ämnen beroende på hydrologin i en bäcknära omgivning (Jutebring Sterte 2021), se avsnitt 12.3. Nyligen har det även uppmärksammats att diken får andra egenskaper än naturliga vattendrag (Peacock et al. 2021), med betydligt högre atmosfärsutsläpp av koldioxid och metan. De processer som styr omsättning och transport av radionuklider i rinnande vatten påverkas direkt eller indirekt av metabolismen hos växter eller mikroorganismer, men även av kemiska och abiotiska processer, se avsnitt 12.3 och 12.4. Betydelsen av dessa processer för radionuklidomsättning i ytekosystem i vissa framtidsscenarioer bör utredas grundligare.

Vid arbetet med analysen av säkerhet efter förslutning för SFR har inlagring av organiskt kol, gas-transport och upptag av koldioxid via rötter bedömts som viktiga för att beskriva omsättningen av kol-14. Biosfärsmodellen uppdaterades i enlighet med detta i SR-PSU (Saetre et al. 2013). Efter synpunkter från SSM:s externa granskare (Walke et al. 2017) och synpunkter på SE-SFL (SSM 2021a, c)

har SKB inom PSAR inför utbyggnaden av SFR fortsatt arbetet med att utveckla den integrerade modelleringen av stabilt och radioaktivt kol. SKB deltar aktivt i den internationella arbetsgruppen för kol-14 i Bioprot. I analysen av säkerhet efter förslutning används bland annat det försiktiga antagandet att allt kol-14 är tillgängligt för fixering via fotosyntes (i form av koldioxid eller vätekarbonat). Att detta är ett rimligt antagande i omättade jordlager har påvisats experimentellt (Hoch et al. 2014), men i syrefattiga miljöer kan kol-14 även tänkas nå biosfären i form av metan. Det betyder att en mindre andel av ett kol-14-utsläpp är tillgängligt för upptag i växter och resten av näringskedjan, vilket skulle ge lägre beräknade doser om det beaktades.

SKB har initierat arbeten för att beskriva metanomsättning i naturliga ekosystem (Natchimuthu et al. 2015), och genom ett samarbete med Linköpings universitet har SKB tillgång till ett stort och aktivt vetenskapligt nätverk. Innovativ metodutveckling har resulterat i nya mätmetoder (Bastviken et al. 2020, Gålfalk et al. 2021, 2022). Det har bidragit till värdefulla kunskaper om metan- och koldioxidflöden och deras beroende av temperatur och vilken typ av biotop som det handlar om (Sieczko et al. 2020, Gudasz et al. 2021, Kuhn et al. 2021). Metan som når ytekosystem från berget kan oxideras av mikroorganismer och omvandlas då till biomassa eller koldioxid. Den del som inte oxideras kan avges till atmosfären på olika sätt, såsom via bubbelflöde, diffusion genom vatten, eller genom transport via luftkanaler i vattenlevande växter.

Kol-14 från radioaktivt avfall kan antingen nå atmosfären som metan eller koldioxid, eller också tas upp av näringsväven via metanoxiderande mikroorganismer eller via växtupptag av koldioxid (som i sin tur kan ha bildats genom metanoxidation). I både rinnande vatten och i istäckta sjöar uppvisar metan- och koldioxidavgången en stor dynamik och variation (MacIntyre et al. 2021, Rudberg et al. 2021, Sawakuchi et al. 2021, Schenk et al. 2021). I ett pågående arbete kommer kunskapsläget kring omsättning av metan och koldioxid i sjöar att sammanställas. En litteratursammanställning med fokus på metanutsläpp från geologiska slutförvar visar att metan som når sjöar och våtmarker under vissa förhållanden kan oxideras fullständig innan det når atmosfären (Ikonen 2022). Preliminära resultat från metanmätningar i Forsmark visar dock hög metanemission från en våtmark, vilket indikerar att både metanbildning och metanavgång kan vara viktiga i miljöer där radionuklidutsläpp från ett förvar skulle kunna ske. Osäkerheterna när det gäller omsättningen av metan betyder att det även fortsättningsvis är rimligt att använda det försiktiga antagandet att all kol-14 i metan kommer att vara biotillgänglig, och alltså kunna leda till exponering via föda.

Transport och upptag av gas kan också vara av betydelse för andra ämnen som kan dunsta, till exempel selen, jod och klor (Hardacre och Heal 2013, Svensson 2019, Thiry et al. 2022). I naturliga system förekommer klor ofta som den relativt mobila kloridjonen, men klor kan också tas upp av växter eller omvandlas till organiska klorföreningar. Omvandlingen och upptaget av klor styrs av biologiska processer i marken och i växterna. Fördelningen av klor mellan olika pooler i terrestra system har främst studerats i väl-dränerade miljöer, och där är uppehållstiden förvånansvärt lång (Bastviken et al. 2013, Svensson et al. 2021a).

Undersökningar i Forsmark har visat att det även finns stora förråd av klor i marken i fuktiga och våta miljöer samt att mängden oorganiskt klor i ved och markvegetation också kan vara betydande. Resultaten tyder på att transporten av klor genom dessa miljöer också bromsas upp via upptag och ackumulation, samt att den naturliga belastningen av klor kan vara högre i utsläppsområden än i torrare områden. Dessutom verkar mängden klor i vegetationen inte vara relaterad till koncentrationen i mark, utan snarare till artsammansättningen (Svensson et al. 2021b).

Den metodik för analys av doser till andra organismer än människa, som ursprungligen användes i SR-Site, har uppdaterats (Jaeschke et al. 2013). Den uppdaterade metodiken användes i analysen för SR-PSU där den integrerades med transport- och ackumulationsberäkningarna (SKB TR-14-06). Den potentiella dosen till andra organismer än människa har i SKB:s genomförda analyser av säkerhet efter förslutning (SR-Site och SR-PSU) visat sig ligga betydligt lägre än de screeningnivåer som föreslagits av ICRP och IAEA. Detta trots att SKB:s beräkningsmetodik är mer konservativ än de av IAEA föreslagna metoderna (IAEA 2018). SKB avser att fortsätta följa den internationella utvecklingen inom området, och att löpande uppdatera metodiken när detta är motiverat.

SKB har deltagit aktivt i IAEA-projektet Modaria II och i Bioprot i en revidering av IAEA:s Biomassmetodik (Lindborg 2018, Brown et al. 2022, Griffault et al. 2022, Lindborg et al. 2022) och fortsätter delta i Bioprot och IAEA Mereia.

Program

- Utveckling av alternativa eller mekanistiska upptagsmodeller för att beskriva växtupptag.
- Fortsatt arbete med att utveckla modellerna för transport och ackumulation av klor-36.
- Fortsatta undersökningar för att öka kunskapen om betydelsen av metanomvandling för kol som når ytekosystem (bäckar, sjöar och våtmarker) via djupt grundvatten i Forsmark.
- Odling av grödor i olika jordbruksjordar för provtagning och analys av upptag av olika ämnen (Byle gård).
- Koordinerade provtagningar av växt- och jordprover i Forsmark med fokus på våtmarker med utströmning av djupt grundvatten.
- Analys av data från Kronosekvensprojektet för att förbättra förståelsen av upptagsprocesser.
- Fortsatt utveckling av modeller och kunskapsunderlag för upptag av olika ämnen hos organismer som förekommer i rinnande vatten.
- Fortsatt följa utvecklingen av skyddet av andra organismer i internationella fora som IAEA och ICRP.
- Fortsatt aktivt deltagande i IAEA Mereia och i Bioprotas arbete (bland annat med kol-14).

12.2 Temporal och spatial heterogenitet i landskapet

Landskapets utseende och framtida utveckling är viktiga faktorer för beräknad dos vid ett utsläpp av radionuklider. Beroende på vilken typ av ekosystem ett utsläpp sker till och vilka egenskaper ekosystemet har, kan den beräknade dosen påverkas flera storleksordningar.

I analysen av säkerhet efter förslutning identifieras potentiella utsläppsområden, biosfärsobjekt, inom vilka dos till människa och biota beräknas. Biosfärsobjekten avgränsas med hjälp av landskapets geometri. Landskapets och biosfärsobjektens egenskaper påverkar hydrologin, transport och ackumulation i olika marklager (regoliten), liksom förutsättningarna för radionuklidupptag och exponering av människor och miljön. Därmed utgör beskrivningen av landskapet och biosfärsobjekten en grund för flera olika typer av analyser inom ämnesområdet ytekosystem.

Nuläge

Som ett underlag för analyser av säkerhet efter förslutning i Forsmark och Laxemar-Simpevarp har SKB tagit fram en beskrivning av de företeelser och processer som styr landskapets utveckling fram till idag (Söderbäck 2008). Den historiska beskrivningen har, tillsammans med beskrivningen av dagens landskap och förståelsen för hur det fungerar (SKB TR-08-05, TR-09-01), använts för att beskriva en sannolik utveckling av landskapet under olika antaganden om framtida klimat och strandlinjeutveckling. Förutom de storskaliga och långsamma förändringar som orsakas av klimatvariation och strandlinjeförskjutning (kapitel 13) påverkas landskapet också av att sediment tillförs och omlagras, vilket bland annat innebär att sjöar grundas upp och växer igen (Brydsten och Strömgren 2010). När successionen gör att olika ekosystem avlöser varandra förändras de kemiska och fysikaliska egenskaperna hos mark och vatten, liksom artsammansättningen av växter och djur.

Utströmningsområden för djupt grundvatten förekommer oftast i landskapets topografiska lågpunkter, till exempel i anslutning till sjöar, vattendrag och våtmarker, se avsnitt 12.3. Förutsättningarna för transport och ackumulation av radionuklider i dessa områden bestäms dels av topografien och egenskaperna i det lokala och regionala avrinningsområdet, dels av utströmningsområdets egenskaper i form av till exempel utbredning av och tjocklek på olika jordlager. Den digitala höjdmodellen och jorddjupsmodellen har uppdaterats inom platsmodelleringen (Sohlenius et al. 2013b, Petrone et al. 2020, Petrone och Strömgren 2020). Dessa uppdaterade geometriska modeller behöver inarbetas i landskapsmodellerna.

Det finns en naturlig samvariation mellan storlek och egenskaper hos de utströmningsområden som kan nås av utsläpp, som delvis beror på var i landskapet objekten är belägna (Berglund et al. 2013). I SE-SFL redovisades hur doserna från radionuklider med olika egenskaper påverkas av vilken typ av ekosystem som utsläppen sker i, men också av utströmningsområdenas egenskaper i form av storlek och lagertjocklekar (SKB TR-19-05, TR-19-06).

Variationer i den lokala topografin, jordlagerföljden och ekosystemsuccessionen kan också leda till heterogenitet inom ett utströmningsområde, vilket SSM påpekat i granskningarna av SR-Site och Fud-program 2013. För att undersöka hur småskalig variation i topografi och jordlagertjocklekar påverkar transport och ackumulation av radionuklider som når ett utströmningsområde, har bland annat Comsol-verktyget använts (von Schenck et al. 2015, Silva et al. 2015, Abarca et al. 2016). Studierna omfattar det viktigaste utströmningsområdet för SFR, en markprofil i Krycklanområdet i Västerbotten (Abarca et al. 2016) samt ett utströmningsområde i Laxemar (Sáinz-García et al. 2022). Arbetet planeras att fortsätta i Forsmarksområdet med syfte att studera hur till exempel flödesvägar, lagermäktigheter och redoxzoner påverkar ackumulation av olika ämnen, se avsnitt 12.3.

Det fortsatta arbetet i Krycklanområdet (Lidman 2013) visar att landskapets storskaliga mosaik av skog och våtmark har en stor inverkan på den lokala hydrologin (avsnitt 11.4, Jutebring Sterte 2021) och på de processer som styr lakningen av regoliten (avsnitt 12.3, Lidman et al. 2019), och därmed även på olika ämnens masstransport (Laudon et al. 2021).

Den landskapsutvecklingsmodell som användes i SR-Site (Brydsten och Strömngren 2010) och i SR-PSU (Brydsten och Strömngren 2013) bör uppdateras för att inkludera nyvunna kunskaper och aktuella underlag i beskrivningen av den framtida landskapsutvecklingen. SKB har påbörjat ett arbete med att implementera Untamo-modellen för Forsmarksområdet (Gunia et al. 2021, Gunia och Gunia 2022). Untamo-modellen bygger till viss del vidare på SKB:s tidigare landskapsmodellering, och modellen har använts för att beskriva landskapsutvecklingen i analysen av säkerhet efter förslutning för slutförvaret för använt kärnbränsle i Olkiluoto (Posiva 2013). Det första steget i implementeringen av modellen utgörs av en genomgång och beskrivning av Untamos detaljer jämfört med den tidigare använda landskapsutvecklingsmodellen, för att identifiera skillnader i metodik och resultat mellan de två modellerna (Gunia et al. 2021).

Det finns ny platsinformation från flera undersökningar av våtmarker (Sohlenius et al. 2019, 2020, Sohlenius och Svensson 2021) och av utströmningsområden. Under den gångna Fud-perioden har SKB arbetat med att utveckla och detaljera landskapsmodelleringen. Detta arbete kommer att fortsätta, vilket kommer att bidra till förbättrade uppskattningar av osäkerheter i biosfärsobjektens egenskaper, och även utgöra en grund för detaljerad modellering av hydrologi, se avsnitt 12.3.

För att förstå landskapets inverkan på grundvattenrörelser och ämnestransport under ett kallt klimat-tillstånd har ett område på Grönland framför isranden studerats inom Grasp-projektet. Det omfattande materialet bearbetas fortfarande. Några arbeten har publicerats (till exempel Lindborg et al. 2020), och arbete med ytterligare publikationer pågår. De nya kunskaperna från Grasp har ännu inte utnyttjats fullt ut i landskapsmodelleringen för Forsmark. Vid granskningen av SE-SFL (SSM 2021a, c) framförde SSM att kommande säkerhetsanalyser kan stärkas genom att utreda framtida markanvändning och vattenförsörjning på platsen, till exempel i samband med ett varmare klimat. Nya kunskaper om växthuseffektens påverkan på jordbruk (exempelvis Mattsson et al. 2018) kommer att behöva sättas i sitt sammanhang för ett framtida Forsmark. SKB har även påbörjat ett arbete med insamling av data från en framtida analog plats, Byle gård, som bedöms kunna representera Forsmark om cirka 3 000 år, se avsnitt 12.1.

De flesta av SKB:s analyser visar av säkerhet efter förslutning att det är den uppodlade myren som ger den högsta dosen för många radionuklider. Ett sådant objekt i Forsmark bildas normalt genom avsnörning av en havsvik som sedan växer igen och fylls med sediment. Om objektet har tillräckligt tjocka sediment kan myren sedan dikas ut för odling. I vissa objekt sker istället en tillväxt av våtmarker i sluttningar, och det bildas så kallade hängande myrar. I en pågående utvärdering undersöker SKB hur topografiskt baserade metoder, till exempel Topographic Wetness Index (TWI), Depth To Watertable Index (DTW) (White et al. 2012) eller kombinationer av liknande GIS-baserade metoder (O'Neil et al. 2019), kan användas för att förutsäga utvecklingen och förekomsten av våtmarker.

Program

- Kompletterande platsundersökningar när det gäller regolitens stratigrafi och fysikaliska och kemiska egenskaper i potentiella utströmningsområden.
- Undersökningar för att bättre kunna beskriva igenväxningsförloppet av vikar, sjöar och myrar i Forsmarksområdet.
- Fortsatt utveckling av landskapsutvecklingsmodellen genom att arbeta in nya data från platsundersökningar, inklusive höjd- och jorddjupsmodeller samt att genom fortsatta simuleringar med Untamo uppdatera beskrivningen av landskapsutvecklingen i Forsmark inför kommande analyser av säkerhet efter förslutning.
- Utvärdering och sammanställning av data från Byle gård för att belysa i vilken grad platsen är en lämplig analog för Forsmarks framtida odlingsområden.
- Tillämpa data och kunskaper från Grasp och Krycklan på landskapsnivå i Forsmarksområdet för att beskriva effekter av ett framtida kallare klimat.
- Sammanställa kunskapsläget när det gäller markanvändning och vattenförsörjning under andra klimatförhållanden.
- Slutföra det pågående arbetet med att utvärdera metoder för att beskriva förekomsten av framtida våtmarker i Forsmarksområdet.
- Fortsatt arbete med Comsol-verktyget för att besvara och illustrera flera frågor kring beskrivningen av landskapet, med fokus på den rumsliga upplösningen på och avgränsningen av ingående biosfärsobjekt.

12.3 Transport- och ackumulationsprocesser

Med transportprocesser avses här framför allt abiotisk transport som sker med vatten, partiklar och i viss mån med gas. Med ackumulationsprocesser avses processer som beskriver fastläggning i lösa avlagringar (till exempel via sorption, utfällning eller inlagring i markens organiska material), men däremot inte upptag av radionuklider i organismer, se avsnitt 12.1.

En god förståelse av radionuklidens transport och ackumulation i regoliten, och en ändamålsenlig modell för dessa processer, är avgörande för att kunna uppskatta exponering och dos till människor och andra organismer. Hydrologin påverkar både vilka områden som kan komma att beröras av ett eventuellt utsläpp av radionuklider och vilka mängder och koncentrationer av nuklider som når dessa områden. Fastläggningen avgör hur mycket som kan ackumuleras i marklagren eller associeras till partiklar. Osäkerheterna i parametervärden som beskriver sorptionen (K_d) är ofta stora, vilket påverkar dosberäkningarna.

Nuläge

I avrapporteringen till SE-SFL beskrivs hur den nuvarande kunskapen om transport- och ackumulationsprocesser i biosfären har använts i säkerhetsvärderingen (SKB TR-19-05). Den kombinerade transport- och exponeringsmodellen som används nu och som modifierats sedan SR-Site fick namnet Biotex i SE-SFL (SKB TR-19-05).

I granskningen av SR-Site påpekade SSM betydelsen av hur uppdelningen av marklager skulle kunna påverka den modellerade transporten av radionuklider, och detta undersöktes sedan i den efterföljande säkerhetsvärderingen SE-SFL. Analysen visade att diskretiseringen påverkade ackumulation och tidsförlopp, men effekten var starkt beroende av biosfärsobjektets och radionuklidernas egenskaper (SKB TR-19-05). Vid granskningen av SE-SFL ställde sig SSM och deras konsulter positiva till vidareutvecklingen av Biotex med högre diskretisering (SSM 2021a, c), och den finare diskretiseringen har även använts i den nyligen avslutade säkerhetsanalysen för ett utbyggt SFR.

SSM och dess granskare har efterfrågat enklare radionuklidtransportmodeller som ett komplement till de som används i analysen av säkerhet efter förslutning (SSM 2019). I SE-SFL påbörjades utveckling av en jämviktsmodell med utgångspunkt från den befintliga radionuklidtransportmodellen, för att enkelt och snabbt kunna undersöka hur olika parametrar och antaganden påverkar modellresultaten. I SE-SFL implementerades också en förenklad hydrologisk modell som beskriver vertikalflödena som en funktion av avrinningen (SKB TR-19-05).

Urancedjans sönderfallsprodukter uppvisar sinsemellan olika transportegenskaper och i SE-SFL genomfördes en modelleringsstudie som visade betydelsen av halveringstiden, sorptionen och transporthastigheten i de olika marklagren (SKB TR-19-05). Arbeta med sönderfallskedjor har även genomförts för att studera och modellera transport i utströmningsområden i Forsmark och på platser som motsvarar ett framtida Forsmark (exempelvis Lidman 2009).

Förutom att Cmsol-verktyget ger möjlighet att förfinas tids- och rumsupplösning (avsnitt 12.2) så utgör det också ett komplement till den modellering som gjorts med det hydrologiska verktyget Mike SHE. Cmsol ger möjlighet att i detalj studera mekanismer som drivs av fysikaliska, kemiska och biologiska processer, samtidigt som man kan använda landskapet som en drivande faktor för vattenflöden. I SE-SFL detaljstuderades radionuklidtransporten i det objekt som gav högst doser genom beräkning av vattenflöden och sorption i olika regolitlager i en tredimensionell Cmsol-modell (SKB TR-19-05, Sáinz-García et al. 2022). Studien visade att för flera lager var flöden och halter koncentrerade till vissa områden, medan andra lager effektivt spred ut radionukliderna i en stor volym. Den detaljerade Cmsol-modellen användes även för jämförelser med en förenklad modell i Ecolego (SKB TR-19-05). Resultaten visar att en förenklad modell lämpar sig för att beräkna genomsnittlig ackumulerad aktivitet och koncentration på en skala av ett utströmningsområde med en acceptabel noggrannhet.

I den så kallade S-profilen i Krycklan (Lidman et al. 2017) har fortsatta undersökningar genomförts. Nyligen disputerade en SKB-finansierad doktorand med fokus på hydrologi och ämnestransport nära ytan (Jutebring Sterte 2021). Resultaten visar att variationen i utströmning och interaktioner mellan yt- och grundvatten kan kopplas till avrinningsområdets egenskaper, såsom markegenskaper och tjälens utbredning (Jutebring Sterte et al. 2018). Marktjälen var också viktig för den småskaliga flödesdynamiken och kunde förklara variation i bäckvattenkvalitet (Jutebring Sterte et al. 2021a). Vidare kunde vattenkvalitet, vittringshastighet och källor för organiskt material i bäckvatten kopplas till avrinningens transporttider och transportvägar (Jutebring Sterte et al. 2021b). Arbetet är av betydelse för modellering av framtida transport eftersom det visar att det kan vara möjligt att koppla avrinningsflöden och interaktioner mellan yt- och grundvatten direkt till områdesegenskaper.

Vid transporten av radionuklider från terrestra till akvatiska ekosystem är zonen nära vattendraget viktig. Detta kan leda till att koncentrationen av vissa ämnen, exempelvis torium, är hundrafalt högre i markvattnet i den bäcknära zonen i jämförelse med normala skogsjordar. Det finns dock inga tydliga skillnader när det gäller upptaget i vegetationen, vilket troligtvis hänger samman med att dessa ämnen i hög grad är bundna till löst organiskt kol och därmed inte är tillgängliga för upptag i växter (Lidman et al. 2017). För att förstå den långsiktiga massbalansen i dessa miljöer är lantanidserien, i synnerhet europiumanomalier, av särskilt intresse. En sammanställning av data från Krycklan (Lidman et al. 2019) visade att europium har potential att fungera som spårämne för fastläggningsprocesser och som ett verktyg för att kvantifiera långsiktiga vittrings- och ackumulationsprocesser i jordar.

SSM har påpekat att de hydrologiska simuleringarna i SR-Site och SR-PSU inte beaktade osäkerheter i tillräckligt hög grad. SKB har i SE-SFL visat betydelsen av osäkerheter i ydrologiska parametrar för transport av radionuklider i en känslighetsanalys (SKB TR-19-05). För att kunna hantera hydrologiska parameterosäkerheter i Biotex-modellen, pågår för närvarande även en genomgång av förenklade hydrologiska modeller (till exempel Hype, se Lindström et al. 2010), samt en studie som syftar till att minska beräkningstiden för Mike SHE genom modellförenklingar. Målsättningen för utvecklingsarbetet är att osäkerheter i ydrologin i framtiden ska kunna fångas som dataosäkerhet, vilka kan propageras till i säkerhetsanalysen i form av probabilistiska transportberäkningar med Biotex.

SKB har påbörjat en validering av ytnära hydrologiska modeller i Krycklan genom att använda CFC (freoner) för att bestämma grundvattnets ålder (IAEA 2006, Kolbe et al. 2020).

Program

- Högupplöst fysikalisk och kemisk modellering med Comsol-verktyget för att förstå fastläggningsprocesser och underbygga K_d -värden som erhållits från mätningar.
- Fortsatta studier av lakning, mobilisering och ackumulation av ämnen i ett landskapsperspektiv i Krycklanområdet.
- Fortsatt utveckling av den hydrologiska modellen för rinnande vatten, se avsnitt 12.1.
- Insatser för att reducera modellkomplexiteten i hydrologiska modeller med bibehållen förmåga att fånga huvuddragen i nyckelprocesser för transport och ackumulation i biosfären. Arbetet syftar till att möjliggöra stokastiska tillämpningar av numeriska 3D-modeller med förkortade beräkningstider.
- Validering av den hydrologiska modellen som användes för Biotex i SR-PSU.
- Fältstudier av nyckelparametrar för den ythydrologiska modelleringen, såsom hydraulisk konduktivitet och infiltrationskapacitet i regoliten, för att därmed kunna minska osäkerheter i modelleringen.
- Fortsatt arbete med utveckling av CFC som valideringsmetod för hydrologiska modeller och applicering av metoden i Forsmark.
- Fortsatt arbete för att beskriva hur den markkemiska miljön kommer att förändras över tid i Forsmark, i synnerhet effekter av kalciturlakning, för att i förlängningen ta hänsyn till hur ämnens rörlighet och fastläggning kan förändras i ett framtida landskap.

12.4 Radiologiska, biologiska och kemiska egenskaper hos betydelsefulla ämnen

Förutom att olika ämnen tas upp i olika organismer och näringskedjor (avsnitt 12.1) och transporteras och ackumuleras på olika sätt i lösa avlagringar (avsnitt 12.3), så har de också olika kemiska och radiologiska egenskaper. Dessa egenskaper påverkar, i samverkan med den kemiska miljö som ämnena befinner sig i, både deras mobilitet och radiotoxicitet. Det här avsnittet beskriver framför allt programmet som syftar till att mäta eller sammanställa dessa grundläggande egenskaper hos ämnen som är potentiellt viktiga för dos till människor eller andra organismer.

Nuläge

Inför analysen av säkerhet efter förslutning, SR-PSU, sammanställdes de koncentrationsfaktorer (CR) och sorptionsdata (K_d) som sedan användes i analysen av ytnära ekosystem i Forsmark (Tröjbom et al. 2013). Dessa värden har därefter delvis anpassats för Laxemar inför SE-SFL (Grolander och Jaeschke 2019) och uppdaterats för vissa analyser i PSAR inför utbyggnaden av SFR. Värdena baseras i första hand på mätningar från platsen och i andra hand på tillgängliga internationella data. Under åren 2009–2019 har SKB deltagit i IAEA-programmen Emras II och Modaria I och II. Inom dessa program har aggregerade CR- och K_d -värden sammanställts (IAEA 2021a, b). Delar av detta arbete har publicerats i andra sammanhang (Wood et al. 2013, IAEA 2014, 2016). Posiva har också sammanställt kemidata från ytnära ekosystem i Finland (till exempel Aro 2021, Kirkkala och Mikkilä 2021, Lahdenperä och Kuusisto 2021, Salo 2021, Toivola och Haavisto 2021), vilket möjliggör jämförelser och komplettering med de data som SKB använder. Det finns ett behov av att komplettera den nuvarande sammanställningen av K_d - och CR-data med data för ytterligare några ämnen som bedöms vara viktiga för SKB:s olika slutförvar.

Sönderfallskedjor, till exempel urankedjan (bland annat ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb och ^{210}Po) är viktiga för säkerhetsanalysen av Kärnbränsleförvaret, bland annat för att uran utgör en stor del av inventariet och för att ^{226}Ra är dosdominerande. Den naturliga förekomsten och transporten av radionuklider i urankedjan har tidigare studerats i ett potentiellt utströmningsområde i Klarebäcksmossen i Laxemar (Lidman 2009). Tillsammans med en modellstudie i SE-SFL (SKB TR-19-05) visades att de olika isotoperna har olika mobilitet. Sönderfallskedjorna ger ett komplext mönster av när och var de högsta doserna uppträder.

För flera av SKB:s förvar har radionukliderna ^{59}Ni och ^{93}Mo visats sig vara potentiellt viktiga för dos. Inom SE-SFL genomfördes en grundlig genomgång och syntes av tillgängliga kemidata av nickel och molybden från platsundersökningarna (Lidman 2022). Molybden visade överlag hög mobilitet, utom i starkt reducerande miljöer som torvjordar eller organiska sjö- och havssediment, där kraftig ackumulering av ämnet kunde observeras. Nickel visade generellt stora likheter med många andra tvåvärda övergångsmetaller, vilket tyder på att denna grupp generellt styrs av liknande processer. För både nickel och molybden konstaterades det att de platsspecifika K_d -värdena kvalitativt återspeglar de transport- och ackumulationsmönster som kan observeras i platsundersökningsområdena.

Vid Byle gård pågår en omfattande provtagning av olika jordbruksgrödor som odlats i flera olika marktyper. Provtagningen syftar till att komplettera CR- och K_d -data, samt öka förståelsen av hur upptag (avsnitt 12.1) och fastläggning (avsnitt 12.3) av element påverkas av olika marktyper och deras kemiska egenskaper. I avsnitt 12.1 har även olika processer som styr kloromsättningen nämnts, och fortsatt provtagning och kemisk analys av olika klorföreningar planeras för framför allt akvatiska miljöer.

Den kemiska miljö som ett ämne befinner sig i är mer eller mindre avgörande för ämnets kemiska förekomstform (speciering), vilket i förlängningen avgör ämnets egenskaper i denna miljö (Sohlenius et al. 2013a). Den kemiska miljön kan karakteriseras med hjälp av pH, redox, halter av huvudkonstituenterna (det vill säga dominerande an- och katjoner) och närvaro av komplexbildare, till exempel löst organisk kol och järnkolloider.

Genom en rad olika processer, såsom landhöjning, klimatförändringar, vittring och ekosystemsuccession, kan den kemiska miljön på en plats förändras över tiden. Ett exempel är den kalciturlakning som förväntas ske i Forsmark under de närmaste årtusendena, vilket kommer påverka pH-värden och därmed fastläggning och upptag av olika radionuklider. SKB arbetar med en sammanställning av hur förekomsten av kalcit påverkar olika elements egenskaper. Som exempel förväntas uran bli mindre mobilt i ett framtida landskap med lägre kalcitpåverkan (Lidman et al. 2019). En närliggande studie visar på betydelsen av baryutfällningar som påverkar egenskaperna av radium (Jaremalm et al. 2013).

Studier från Krycklans avrinningsområde i norra Sverige visar att kvoten U-234/U-238 kan fungera som en indikator för djupare grundvatten (Lidman et al. 2016) och även i Forsmark syns tydliga skillnader mellan uran från berggrunden och uran från de kvartära avlagringarna. En ny intressant studie från Krycklan använder europium i förhållande till andra lantanoider som en indikator av lakning (Lidman et al. 2019).

Förekomsten av våtmarker och andra organiska jordar är en annan faktor som påverkar mobiliteten hos många radionuklider. Det beror främst på att koncentrationen av DOC är högre, vilket i sin tur leder till lägre pH och en ökad löslighet för järnutfällningar (Köhler et al. 2014). Detta har stor betydelse för mobiliteten hos många svårslösliga radionuklider, då de i vattenfas ofta förekommer bundna till antingen kolloidalt järn eller DOC. Utströmmande djupt grundvatten kan också ha en signifikant effekt på vattenmiljön (avsnitt 12.3) genom att det påverkar både pH och DOC-halten, och därmed också mobiliteten hos många radionuklider (Lidman et al. 2016).

Vid sidan av organiskt material är järn potentiellt viktigt både för sorption och kolloidal transport av ett flertal radionuklider i oxiderande miljöer (Dahlqvist et al. 2007). Den naturliga landskapsutvecklingen kan leda till att tidigare oxiderande miljöer försumpas och blir reducerande, vilket kan destabilisera järnutfällningar och därmed mobilisera ämnen som är bundna till dessa (Ingri et al. 2018).

Program

En stor del av aktiviteterna inom detta område samordnas med de sorptions- och upptagsstudier som redovisats i tidigare avsnitt. Oftast sker provtagning och kemiska analyser vid samma tillfälle och redovisas här som en aktivitet:

- Sammanställning och utvärdering av kemidata från SKB:s undersökningar, tillsammans med tillgängliga kemidata från andra platser i Norden, för att bestämma K_d och CR och för att öka kunskapen om hur den kemiska miljön påverkar K_d och CR.
- Översyn av metodiken för val av värden för sorption och upptag (K_d och CR), och för bestämning av dessa värdenas osäkerhetsintervall, vid analys av säkerhet efter förslutning.

- Kompletterande provtagningar (parade prover) för olika ämnen inom provtagnings- och övervakningsprogrammet för Forsmark, Byle gård eller i kampanjer. Prover ska företrädesvis insamlas från potentiella utströmningsområden och jordbruksmarker. Utöver elementkoncentrationer mäts andra fysikaliska och kemiska markegenskaper, bland annat pH, organisk halt, lerhalt samt närvaro av komplexbildare i vattenprover.
- Utvärdering av mildare lakningsmetoder vid analys av olika ämnen i jordprover, med syfte att erhålla resultat som är mer representativa för den kemiska miljö som råder i utströmningsområden.
- Fördjupade studier och utvärdering av fördelningsmönster för klor för att kunna knyta fördelningen till ämnets egenskaper och till processer i ekosystemen, och för att bättre kunna modellera klorets kretslopp i ekosystemet.
- Utvärdering av hur den markkemiska miljön i Forsmark förändras över tid.
- Fortsatta studier i Krycklanområdet för att öka kunskapen om urlakning och anrikning av olika ämnen i en bäcknära zon.
- Utredning om hur järnkolloider och DOC påverkar transporten av mer svårslösliga radionuklider.
- Den studie av hur man kan använda lantanoider som spårämnen för lakning som har påbörjats i Krycklan kommer att fortsätta i Forsmarksområdet.
- Genomgång av data från platsundersökningsområdena för isotoper som ingår i de naturliga sönderfallskedjorna samt kompletterande undersökningar av isotoper i urankedjan.

13 Klimat och klimatrelaterade processer

Inom klimat och klimatrelaterade processer finns det återstående frågor med bäring på alla tre slutförvaren (SFR, Kärnbränsleförvaret, SFL). För SFR:s och Kärnbränsleförvarets del handlar dessa framför allt om att minska osäkerheter i analysen av säkerhet efter förslutning, medan de för SFL:s del handlar om att ha ett tillräckligt och uppdaterat underlag för den kommande första analysen av säkerhet efter förslutning. Utöver det behöver forskning bedrivas för att utvärdera den metodik som används för att hantera klimatfrågor i säkerhetsanalyserna, samt arbete genomförs för att säkerställa att klimatscenerierna är ajour med rådande kunskapsläge. Förutom att förse säkerhetsanalyserna med information och data, relaterar vissa av frågorna inom klimat även till utformningen av de tre förvaren. Här beskrivs vilka aktiviteter som är planerade att genomföras för att uppnå detta.

13.1 Klimatscenerier och utvärdering av extremer

SKB:s klimatscenerier ligger till grund för många av de analyser som görs inom ramen för säkerhetsanalyserna för de tre förvaren. Det är därför viktigt att klimatscenerierna är ajour med rådande kunskapsläge, samt att de inkluderar och beskriver de extremer i klimat och klimatrelaterade processer som är av vikt för förvarens funktion och säkerhet.

Den metodik som SKB använder för att hantera klimat och identifiera extremer inom klimat och klimatrelaterade processer har hittills huvudsakligen baserats på historisk klimatinformation. Med en ny oberoende metod, vilken simulerar klimat för de kommande en miljon åren, ska SKB:s metodik analyseras i syfte att utröna om den på ett adekvat sätt har identifierat nödvändiga extremer i klimat med betydelse för förvarens säkerhet efter förslutning. I tabell 13-1 anges exempel på extremer samt vilka frågor som de har bäring på, framför allt i Kärnbränsleförvarets analys av säkerhet efter förslutning.

Tabell 13-1. Exempel på klimatrelaterade extremer med betydelse för analysen av förvarens säkerhet efter förslutning samt vilken fråga/vilka frågor i främst Kärnbränsleförvarets analys av säkerhet efter förslutning som respektive extrem kopplar till.

Extremförhållande av betydelse för analysen av säkerhet efter förslutning	Kopplad fråga i säkerhetsanalyserna
Maximal tid med glaciala förhållanden under kommande årmiljonen	Buffererosion/kapselkorrosion
Maximalt och minimalt antal passager av inlandsisarnas fronter	Förhöjda grundvattenflöden/ buffererosion/transporttider
Glaciationsdynamik	Isostatisk last på kapsel/bergspänningar
Maximala längden på perioder med kallt torrt klimat utan inlandsis	Maximalt permafrostdjup/grundvattenflöde/frysning av buffert och återfyllning
Maximala längden på nuvarande interglacial (värmepperiod)	Längd på initial tidsperiod med utspädda grundvatten och på geokemi/buffererosion/ landskapsutveckling

Utvärderingen görs genom att jämföra extremer i klimat identifierade med den nya metoden med motsvarande extremer som tidigare identifierats med annan metodik (till exempel SKB TR-10-49, TR-11-01, TR-13-05, TR-20-12).

Frågan om längden på nuvarande interglacial är också relevant för modelleringen av landskapsutveckling, liksom för analysen av säkerhet efter förslutning för SFR, eftersom en längre interglacial innebär att ett kallare klimat inträffar senare, när en potentiell påverkan på slutförvarets barriärer blir mindre betydelsefull.

Nuläge

För utvärderingen av metoder att identifiera extremer i klimat, görs i en första fas simuleringar av klimatets utveckling för de kommande en miljon åren, bland annat baserat på olika grad av koncentration av växthusgaser i atmosfären samt kända framtida variationer av solinstrålning mot jordytan. Eftersom simuleringarna beaktar dessa variationer så innehåller de resulterande klimatscenerierna, till skillnad från de klimatscenerier SKB använt i sina säkerhetsanalyser, en mer realistisk variabilitet hos klimat och glaciala cykler för de kommande en miljon åren. Först genomförs ett stort antal globala klimatsimuleringar, varefter en nerskalning till Forsmarksplatsen görs för ett urval av dessa. Denna fas av studien finns redovisad i Lord et al. (2019). I den skalades enbart en (av många tänkbara) realiseringar ner till Forsmark och klimatdata presenterades för denna.

Resultaten visar att det finns en betydande naturlig variabilitet hos klimatet på dessa långa tidsskalor, med svängningar i luftens årsmedeltemperatur på upp emot tio grader och återkommande kortare och längre perioder med glaciation. Vidare visar resultaten att de antropogena utsläppen av växthusgaser har en mycket stor påverkan på klimatet de kommande 100 000-tals åren. Vid kraftiga utsläpp kan nästa glaciala period förskjutas framåt flera 100 000 år (Lord et al. 2019).

För utvärdering av om nuvarande metodik på ett adekvat sätt har identifierat och beskrivit extremer som ingår i analysen av säkerhet efter förslutning, behövs ett bredare statistiskt underlag än från den enda nerskalningen till Forsmarksplatsen i Lord et al. (2019).

Program

- Flera av de befintliga globala klimatsimuleringarna från Lord et al. (2019) skalas ner till Forsmarksplatsen för att ta fram ett bredare statistiskt underlag för analysen av extremer.
- En utvärdering av klimatextremer genomförs baserat på data från de nerskalade klimatsimuleringarna. Utvärderingen utgör utgångspunkt för eventuell uppdatering eller komplettering av SKB:s klimatfall.
- Om ovan nämnda utvärdering av klimatextremer motiverar ytterligare studier av klimatrelaterade processer (till exempel kompletterande simuleringar av extremer hos inlandsis, permafrost/frysning, glacial isostatisk förändring, glacial erosion), kommer detta att bedömas och vid behov genomföras.

13.2 Historiska klimatförändringar

SKB:s klimatscenerier som används i analyserna av säkerhet efter förslutning baseras dels på hur klimatet har varierat historiskt, dels på simuleringar av framtida klimat. De historiska klimatvariationerna studeras både med klimatmodeller och genom analys av data från olika typer av geologiska klimatarkiv. Exempelvis baseras SKB:s så kallade referensglaciation utslutande på en upprepning av klimat- och miljöförhållanden som rekonstruerats för den förra istidscykeln (med den glaciala perioden Weichsel och nuvarande värmeperiod holocen). För att få nödvändig information om hur klimat varierat under denna glaciala cykel bedrivs bland annat studier av geologiska klimatarkiv. Resultaten kring historiska växlingar i lufttemperatur, nederbörd och vegetation används för att ge en nyanserad bild av klimatförändringarna som kan ske i) vid klimatövergången från varma interglaciala förhållanden till kalla glaciala förhållanden, ii) under varma perioder (interstadialer) och kalla perioder (stadialer) under istidsperioden, och iii) vid övergången från istidsförhållanden tillbaka till interglacial (värmepериод). Kunskapen används i beskrivningarna av och motiveringarna till klimatfallen som används i SKB:s olika analyser av säkerhet efter förslutning. Dessutom ger de nödvändig information och klimatdata till andra ämnesområden där effekten av klimatförändringarna studeras, till exempel inom hydrogeologi och ytekosystem.

Nuläge

Rekonstruktioner av klimatet under olika perioder av glacialen Weichsel, nuvarande interglacial holocen och den förra interglacialen Eem har genomförts bland annat genom analyser av sjösediment från Sokli i norra Finland. I studien analyseras ovanligt mäktiga och fossilrika sediment av senkvartär ålder bevarade in situ i Sokli-sänkan. Studierna bidrar med viktig information om hur snabbt klimatet i Skandinavien kan skifta under olika faser av en glaciationscykel, och även hur kraftiga klimatvariationerna kan vara i form av temperatur och i vissa fall nederbörd.

Resultaten från de genomförda studierna vid Sokli har sammanfattats i Helmens (2019). Där ges en detaljerad rekonstruktion av klimat och miljö för nordöstra Fennoskandia från multiproxydata för i) interglacialen holocen (de senaste 11 000 åren), ii) för varma respektive kalla perioder under tidig Weichsel (Marina isotopstadierna (MIS) 5c-d för cirka 115 000 till 90 000 år sedan) samt iii) för den föregående interglacialen Eem (perioden MIS 5e för cirka 130 000 till 115 000 år sedan). Resultaten kompletterar tidigare resultat, vilka tillhandahåller motsvarande information för mitt-Weichsel (MIS3 för cirka 50 000 år sedan) (Helmens 2009) och övergripande för hela Weichsel (MIS 5-2, 130 000 till 15 000 år sedan) (Helmens 2013).

I och med en avslutad analys av den interstadiala perioden Odderade under tidig Weichsel (MIS 5a för cirka 85 000 till 74 000 år sedan) (Helmens et al. 2021), analysen av interglacialen Eem (Katrantsiotis et al. 2021, Plikk et al. 2021, Salonen et al. (2021), och en kompletterande analys av nuvarande interglacial holocen (Rijal et al. 2021), så är analysen av varma och kalla perioder under den senaste glaciala cykeln från sjösediment från Sokli avslutad. Ytterligare resultat från studierna vid Sokli finns inkluderade i Finné et al. (2019) och Felde et al. (2020). För referenser till redovisningar av tidigare resultat, se kapitel 14 i Fud-program 2019. Resultaten har bland annat visat att när klimatet senast gick från varma interglaciala förhållanden till istidsförhållanden, skedde denna övergång under mycket lång tid och med kraftiga växlingar mellan varma och kalla perioder (till exempel Helmens 2013, 2019, Helmens et al. 2021). Resultaten från Sokli reviderar på så sätt delvis tidigare rekonstruktioner av glaciations- och klimathistoria för de senaste 130 000 åren, framför allt vad gäller övergången från varma interglaciala förhållanden till kalla glaciala förhållanden (till exempel Helmens et al. 2021, Dalton et al. 2022).

Resultaten från studien av sjösediment från Sokli i norra Finland har framgångsrikt bidragit till väldaterad kvantitativ information om hur klimat och miljö i norra Fennoskandia varierat under de senaste 130 000 åren (inklusive den senaste glaciala cykeln Weichsel/holocen). Genomförandet av den här typen av studier bidrar till att förbättra dateringen av terrestra klimatarkiv i Fennoskandia och Europa, speciellt när resultaten jämförs med klimatarkiv från andra europeiska lokaler såsom i Wohlfarth (2013), Helmens (2019) och Schenk och Wohlfarth (2019).

Program

- En systematisk sammanställning av alla tidigare resultat om historiska klimat- och miljöförhållanden under senaste istiden (Weichsel), innevarande värmeperiod (holocen), samt föregående värmeperiod (Eem), erhållna från geologiska studier som SKB finansierat på platsen Sokli i norra Fennoskandia.
- Sammanställningen ovan planeras att sättas i ett större sammanhang och jämföras med klimatrekonstruktioner från andra platser i Europa med syfte att bättre beskriva hur det rekonstruerade klimatet i norra Skandinavien kan användas för att bedöma klimatet i centrala Sverige (Forsmark).

13.3 Havsnivåvariationer och strandlinjeförskjutning på kort och lång sikt

SKB bedriver arbete kring havsnivåförändringar på olika tidsskalor, dels fram till år 2100, dels för de kommande 10 000 åren. Arbetet innebär sammanställningar av det vetenskapliga kunskapsläget, som är under snabb utveckling, och platsspecifika havsnivåsimuleringar för platsen Forsmark. För Kärnbränsleförvarets del kommer resultaten av analysen fram till år 2100 att användas i arbetet med dimensionerade havsnivåer, så att förvaret (tillfarer och ovanmarksdelar) utformas för att stå emot en maximal höjning av havsytan (höjning av medelvattenytan plus höjning vid stormflod) under uppförande- och driftfasen. Även för SFR är resultaten fram till år 2100 av relevans för att säkerställa att förvaret kan motstå tänkbara havsyttehöjningar under driftperioden. Därutöver används resultaten för perioden fram till år 2100 som initialtillstånd i analyserna av säkerhet efter förslutning som ingår i PSAR för Kärnbränsleförvaret och SFR. Även havsnivån i Oskarshamn studeras eftersom den är viktig för analys av hydrologin kring Clab.

Studierna av havsnivåvariationer för de kommande 10 000 åren används i SKB:s säkerhetsanalyser, där resultaten är nödvändiga för analysen av landskapsutvecklingen i Forsmark (fördelning land/hav

och dess förändring över tid), samt för analyser av geokemi och hydrogeologi. För SFR är analysen av havsnivåer dessutom avgörande för att bedöma hur länge området ovanför förvaret sannolikt kommer att förbli havstäckta, och för att erhålla extremvärden för hur lång/kort den havstäckta perioden skulle kunna bli.

Nuläge

Nuvarande kunskapsläge kring tänkbara framtida havsytteförändringar på kort och lång sikt har sammanställts och redovisas i SKB (TR-20-12). Sammanställningarna inkluderar maximal havsnivåhöjning för olika grad av utsläpp av växthusgaser. Resultaten visar, som väntat, att osäkerheten kring storleken på framtida havsyttehöjning är mycket stor, både på kort sikt fram till 2100 (tabell 5-3 och 5-9 samt figur 5-16 i SKB TR-20-12) och för de kommande 10 000 åren (tabell 5-5 och 5-12 samt figur 5-4 och 5-23 i SKB TR-20-12). Osäkerheten härrör huvudsakligen från hur stor den framtida klimatuppvärmningen kan tänkas bli och på hur kraftigt jordens kryosfär (framför allt de antarktiska och grönländska inlandsisarna) kommer att reagera på klimatuppvärmningen (avsnitt 5.1.3 och 5.2.3 i SKB TR-20-12).

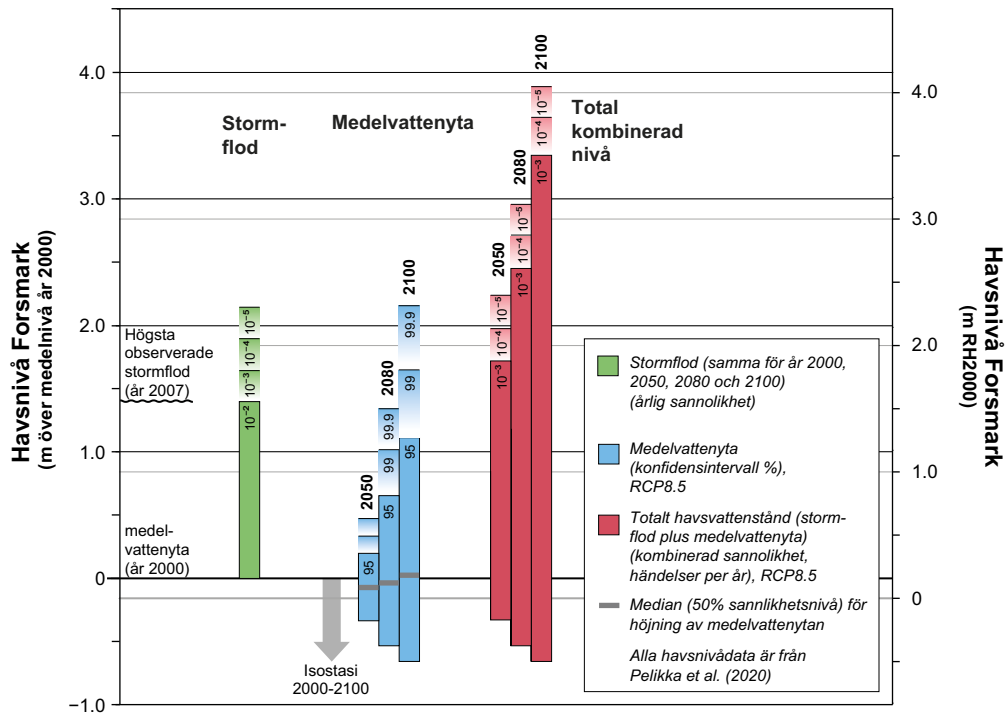
I stora delar av Sverige sker en isostatisk upplyftning av jordskorpan som en respons på den senaste deglaciationen. I Forsmark uppgår denna upplyftning idag till 6,7 millimeter per år (Vestøl et al. 2019) och hastigheten förväntas vara relativt oförändrad fram till år 2100. Om den eustatiska havsyttehöjningen inte skulle bli omfattande så kommer den isostatiska upplyftningen att delvis eller helt kunna kompensera för den framtida havsyttehöjningen. Om havsyttehöjningen däremot blir kraftig kan den isostatiska höjningen inte kompensera för hela denna, och den relativa havsnivån i Forsmark skulle stiga.

En uppdatering av kunskapsläget kring höjningen av medelvattennivån och vid storm i närtid (fram till år 2100) har genomförts för Forsmark och rapporterats i Pellikka et al. (2020) och i SKB (TR-20-12, avsnitt 5.1 och 5.2). I Pellikka et al. (2020) beräknades bidraget till havsnivåhöjningen från stormar med återkomsttider upp till 100 000 år. Studien innehåller även en probabilistisk uppskattning av hur mycket den totala havsnivån (höjningen av medelvattennivån plus höjningen vid stormflod) maximalt kommer att stiga vid Forsmark fram till år 2050, 2080 och 2100 för klimat-scenarierna RCP2.6 (låga utsläpp av växthusgaser), RCP4.5 (medelhöga utsläpp) och RCP8.5 (höga utsläpp). På kort sikt, fram till år 2100, visar studien att den isostatiska höjningen resulterar i att de lägre projektionerna av havsyttehöjning (för låga och medelhöga utsläpp) enbart medför en fortsatt marin regression likt idag, där land stiger ur havet (Pellikka et al. 2020). För höga utsläpp av växthusgaser, eller för havsyttehöjningar med lägre sannolikhet (vid lägre utsläpp), visar resultaten dock att uppvärmningen kan resultera i en marin transgression (där land dränks av hav) orsakad av en höjning av medelvattenytan fram till år 2100 (Pellikka et al. 2020, tabell 5-10 i SKB TR-20-12).

Figur 13-1 visar havsyttehöjningen i Forsmark vid höga utsläpp av växthusgaser (RCP8.5) från Pellikka et al. (2020). Trots den pågående isostatiska upphöjningen är maximala höjningen av medelvattenytan i detta pessimistiska fall runt en meter fram till år 2080 och två meter till år 2100. Resultaten visar också att havsnivåhöjningen fram till 2100 sker med accelererande hastighet (detta syns inte i figur 13-1). Vid analysen av tänkbara framtida maximala havsnivåer i Forsmark tillkommer även den ytterligare höjning (stormflod) som tillfälligt kan ske vid kraftiga stormtillfällen. Studien visar att den maximala havsnivån vid kraftiga stormar skulle kunna öka med cirka tre meter över dagens nivå fram till 2080 AD och drygt fyra meter fram till 2100 AD för en årlig sannolikhet på 10^{-5} (figur 13-1). Dessa resultat används bland annat för att planera och konstruera Kärnbränsleförvarets ovanmarksdelar för att motstå förhöjda havsnivåer under bygg- och driftstiden.

Även på lång sikt medför den pågående isostatiska höjningen att de lägsta projektionerna av havsyttehöjning resulterar i en fortsatt marin regression, likt dagens situation. De högsta projektionerna av framtida havsyttehöjning under de kommande 10 000 åren resulterar däremot i en kraftig marin transgression, följt av en regression. Dessa projektioner leder till en period med förhöjd havsytta (relativt dagens) i upp till 7 500 eller 14 000 år, beroende på graden av uppvärmning (avsnitt 5.1.3 och 5.2.3 i SKB TR-20-12).

För att täcka in den mycket stora osäkerheten i framtida havsyttenivå i tidsperspektivet 10 000 och 100 000 år, används därför flera olika tänkbara initialt havstäckta perioder i SKB:s analyser av säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret (SKB TR-20-12) och SFR.



Figur 13-1. Projektioner av höjning av den relativa havsnivån i Forsmark för åren 2050, 2080 och 2100 för det pessimistiska utsläppsscenarioet RCP8.5 (avsnitt 5.2 i SKB TR-20-12), baserat på data från Pellikka et al. (2020). Den totala maximala höjningen (röd färg) erhålls genom att lägga ihop medelvattenytans höjning (strandlinjeförskjutningen, blå) och den tillfälliga höjningen vid stormflod (grön). En signifikant del av medelvattenytans höjning kompenseras av den pågående isostatiska höjningen av markytan (grå pil). Vänstra y-axeln visar höjning över medelvattenytan år 2000 och högra axeln höjning uttryckt i höjdsystemet RH2000. För detaljer, se avsnitt 5.2 i SKB (TR-20-12).

Program

- SKB kommer fortsätta att följa utvecklingen inom forskningsområdet framtida havsnivåvariationer på kort sikt (fram till 2100) och lång sikt (kommande 10 000 åren), både vad gäller höjning av medelvattenytan och höjning vid storm. Vid behov kommer nya sammanställningar av kunskapsläget att göras. Kopplat till detta följs kunskapsläget kring framtida global uppvärmning och de antarktiska och grönländska inlandsisarnas respons på uppvärmningen.
- Utveckling av en modell som omvandlar globala projektioner av medelhavsytans höjning till regionala förhållanden i Forsmark genom att ta hänsyn till den isostatiska återhämtningen samt hur mycket olika inlandsisars avsmältning bidrar till höjning av havsytan i Östersjön.
- Uppdatering av havsnivåprojektionerna (fram till år 2100) för Forsmark (Pellikka et al. 2020) då nytt underlag kring global havsytehöjning motiverar detta.
- Sammanställning av kunskapsläget kring framtida tänkbara förändringar i salthalt i Östersjön givet olika scenarier för framtida klimatutveckling.

13.4 Denudationsprocesser som påverkar bergytan, inklusive kvantifiering av historisk och framtida glacial erosion

Över långa tidsperspektiv sker en nedsänkning av bergytan på grund av erosion och vittring, sammantaget kallat denudation. Om denudationen är ojämnt fördelad över relativt flack terräng ökar den topografiska reliefen hos markytan, vilket i sin tur kan påverka de hydrologiska förhållandena (i form av markavrinning och grundvattenflöde i de ytligare delarna av berget) samt fördelningen av bergspänningar i de översta hundratalet metrarna av berget (Moon et al. 2020). Om kraftig denudation skulle ske i anslutning till Kärnbränsleförvaret, påverkar detta förvarsdjupet och därmed till exempel möjligheten för frysning att nå ned till förvaret (SKB TR-20-12, avsnitt 5.5.4). Under mycket långa tidsperioder (förmodligen flera tiotal miljoner år) skulle denudationen i Forsmark kunna medföra att förvaret hamnar nära eller vid markytan. Den största delen av denudationen i Forsmark sker genom glacial erosion vid återkommande nedisningar.

En god förståelse av de erosionsprocesser som varit aktiva i Forsmark historiskt sett och som förmodas vara det även i framtiden, är därför av stor vikt, inklusive kvantifiering av maximal glacial erosion under de kommande 100 000 och en miljon åren. Dessa frågor studeras genom en kombination av fältstudier, datering av exponeringsåldern hos bergytan med kosmogen bildade isotoper, geomorfologisk analys samt numerisk modellering.

Nuläge

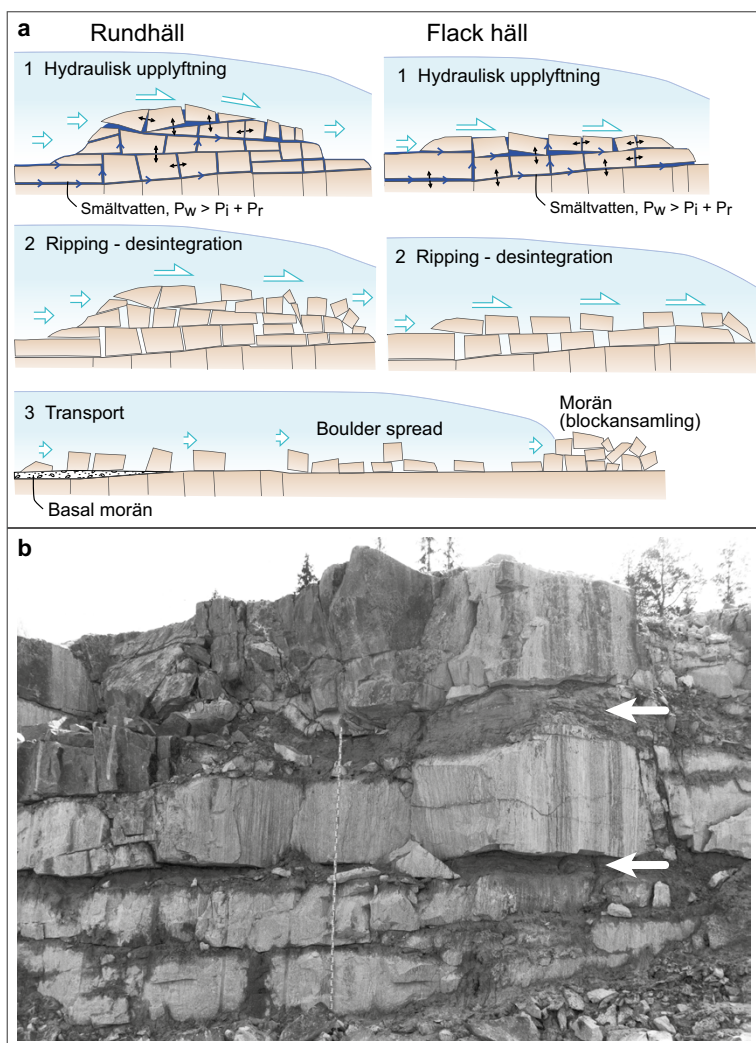
Studier redovisade i tidigare Fud-program har visat att omfattningen av den totala denudationen av den kristallina berggrunden i Forsmark generellt sett har varit låg under de senaste en miljon åren (från ett par få meter upp till runt 50 meter) (Olvmo 2010, Hall et al. 2019a). Spannet beror dels på att det finns en stor variation i omfattningen av denudation över platsen, dels på vilken statistisk sannolikhet som används. Oavsett vilken metod som använts för att beräkna den historiska denudationen (geomorfologisk analys eller exponeringsåldrar uppskattade med kosmogen bildade isotoper) visar resultaten på en begränsad historisk denudation av den kristallina berggrunden (Olvmo 2010, Hall et al. 2019a), dock med en tydlig variation över platsen. Den begränsade denudationen beror till stor del på den flacka topografin hos urbergsytan i området, vilket gör att erosionskapaciteten hos inlandisen är lägre än hos till exempel mer aktiva delar av inlandisar, eller alpina glaciärer, lokaliserade på platser med kraftigare topografisk relief. Glacial erosion har utgjort den viktigaste denudationsprocessen i Forsmark under de senaste miljoner åren, och den förväntas vara det även under de kommande en miljon åren (Hall et al. 2019a, SKB TR-20-12).

Lord et al. (2019) presenterade en preliminär utveckling av när och hur länge inlandisar kan komma att täcka Forsmark under de kommande en miljon åren, givet olika scenarier för utsläpp av växthusgaser (avsnitt 13.1). Om den typiska historiska glaciala erosionen, såsom bestämd i Hall et al. (2019a), antas gälla för de framtida glaciala perioderna beskrivna av Lord et al. (2019), så visar den preliminära analysen att den totala denudationen i Forsmark under de kommande en miljon åren också blir begränsad (Hall et al. 2019a). Det uppskattade djupet på den totala denudationen av fast berg under de kommande 100 000 åren uppgår då till mindre än en meter för Forsmarksplatsen, inklusive platsen för Kärnbränsleförvaret. För de kommande en miljon åren, har den totala denudationen av fast berg på samma sätt preliminärt uppskattats till från några få, upp till några få tiotal, meter. Den stora spridningen är orsakad av en (förväntat) stor rumslig variation över Forsmarksplatsen och närliggande undersökta områden. En denudation på några få tiotal meter under de kommande en miljon åren bedöms preliminärt inte påverka säkerheten för Kärnbränsleförvaret negativt, varken med avseende på framtida maximala frysdjup under periglaciala perioder (SKB TR-20-12, avsnitt 3.5, 4.5 och 5.5), förändringar i spänningar i övre delen av berget eller hydrogeologiska förändringar.

Osäkerheten på den uppskattade framtida denudationen bedöms som förhållandevis stor, framför allt beroende på de preliminära uppskattningarna av längden hos de framtida nedisningarna såsom de beräknats i Lord et al. (2019). En annan, mindre, osäkerhet är att beräkningarna antar att effektiviteten hos den glaciala erosionen under tidigare nedisningar även kan antas gälla för framtida nedisningar. Detta antagande bedöms dock som rimligt.

Under den gångna Fud-period har två delstudier, som undersökt ett av grundantagandena i den geomorfologiska analysen i Hall et al. (2019a), genomförts (Goodfellow et al. 2019, Hall et al. 2019b). Ingen av dessa studier ändrar dock på slutsatsen i Hall et al. (2019a), att den historiska denudationen av kristallin berggrund i Forsmark varit låg under de senaste en miljon åren. För detaljer, se Goodfellow et al. (2019) och Hall et al. (2019b).

I Hall et al. (2019a) identifierades en ny glacial erosionsprocess kallad "glacial ripping". Denna erosionsprocess skulle under vissa omständigheter kunna vara förhållandevis effektiv på de platser den verkar, i jämförelse med glacialerosionsprocesserna glacial plockning och slipning. Glacial ripping är en process där större flak av den allra översta delen av berggrunden eroderas bort vid ett och samma tillfälle. Processen bygger på att ett högt vattentryck bildas under frontnära delar av en inlandsis under isens avsmältningsskede. Det höga trycket propagerar ner i befintliga, ytligt liggande, subhorisontella sprickor i berggrunden, varvid det översta lagret av berggrunden lyfts upp (hydraulisk upplyftning). Isrörelsen förflyttar och disintegrerar sen berggrundsskiktet till block, vilka till sist avlagras i form av ett blockfält eller en blockansamling bakom den retirerande iskanten. Figur 13-2a visar en konceptuell bild av hur glacial ripping går till och figur 13-2b visar ytliga subhorisontella sprickor observerade i Forsmark. Processen, som förutsätter en förekomst av ytliga subhorisontella sprickor några få meter ner i berget, har historiskt varit verksam inom vissa delar av Forsmark (Hall et al. 2019a, 2020). Glacial ripping kopplar samman tidigare kända processer och observationer i tidssekvens, vilken förklarar uppkomsten av blockfälten i bland annat Forsmark.



Figur 13-2. a) Konceptuell bild av glacial ripping av rundhällar och flackare hällar. För detaljer, se Hall et al. (2020). b) Subhorisontella ytnära sprickor i Forsmark fotograferade vid bygget av kylvattenkanalen vid kärnkraftverket. Modifierad från Carlsson (1979). Foto: Göran Hansson.

För att öka processförståelsen kring glacial erosion, med fokus på glacial ripping, har under den senaste Fud-perioden en fortsättningsstudie med detta syfte initierats. Studien använder sig av i) geomorfologisk analys av blockfält och blockansamlingar karterade i fält (i Forsmark och i några andra områden med relevant terräng), ii) sprickanalys i fotografier av vertikala skärningar av den ytliga berggrunden i Forsmark (från fotografier tagna vid byggandet av kylvattenkanalen till Forsmarks kärnkraftverk), iii) analys av sprickor och småskalig geomorfologi på hällar, och iv) modellering av blockuppsprickning under glaciala förhållanden.

Baserat på undersökningarna ovan beskriver Hall et al. (2020) processen glacial ripping mer i detalj än Hall et al. (2019a) för områden i östra Sverige med kristallin berggrund med låg relief, bland annat för Forsmark. Studien föreslår att de blockansamlingar som studerades har bildats genom glacial ripping under den senaste fasen av nedisning. En första teoretisk analys av de krafter som behövs för att förflytta uppstickande bergblock, till exempel små bergkullar, genom glidning av is vid botten av en inlandsis, presenterades i Krabbendam och Hall (2019). Sprickanalysen i fotografier av vertikala skärningar av den ytliga berggrunden i Forsmark redovisas i Krabbendam et al. (2021), vilket resulterat i en teoretisk förklaringsmodell för bildandet av nya sprickor genom den hydromekaniska påverkan som sker i den översta delen av berget vid hydraulisk upplyftning. Detta indikerar att hydraulisk upplyftning kan resultera i fortsatt desintegration av det ytliga berget, vilket minskar dess hållfasthet och ökar dess hydrauliska konduktivitet (Krabbendam et al. 2021). Krabbendam et al. (2022) exemplifierar ripping med subglacial desintegration av rundhällar med efterföljande bildning av blockhav och blockgrottor.

En av de undersökta lokalerna utgörs av Bodagrottorna vid Iggesund, ungefär 200 kilometer norr om Forsmark. Resultaten visar att denna, och övriga undersökta lokaler med blockansamlingar, med största sannolikhet är glacialt bildade (Hall et al. 2020, Krabbendam et al. 2022), i linje med hur glacial ripping kan spräcka upp berggrund och bilda blockansamlingar där blockens lägen återspeglar den forna isrörelseriktningen. Krabbendam et al. (2022) visar att tolkningen även stöds av observerad sprickfördelning med djupet från tidigare genomförda borrhningar vid platsen (Carlsten och Stråhle 2000). Vidare visar resultaten att tidigare tolkningar av bildandet av Bodagrottorna, vilka involverat glacialt inducerade skalv (se exempelvis Mörner 2005) och/eller metangasexplosioner (se exempelvis Mörner och Sjöberg 2018), inte är sannolika. För detaljer, se Hall et al. (2020) och Krabbendam et al. (2022).

För SFR analyseras säkerhet efter förslutning för en period om 100 000 år (se till exempel SKB TR-14-01). På grund av att den globala uppvärmningen förväntas förskjuta den första framtida glaciationen framåt i tiden (Lord et al. 2019), förväntas den glaciala erosionen av kristallint berg i Forsmark under de kommande 100 000 åren att vara än mer begränsad än den var under motsvarande historiska perioder (Hall et al. 2019a). Generellt för Forsmark, har den uppskattats till mindre än en meter för denna period (Appendix G i SKB TR-20-12), baserat på att icke-glaciala förhållanden råder på platsen under denna period (Lord et al. 2019).

Hur denudation och glacial erosion fördelar sig över Forsmark under de kommande en miljon åren är av intresse i SKB:s analys av säkerhet efter förslutning för Kärnbränsleförvaret. När det specifikt gäller processen glacial ripping, visar resultaten i Hall et al. (2019a) att denna process historiskt enbart har förekommit vid vissa platser i Forsmark (Hall et al. 2019a). På samma sätt är det troligt att det enbart är vissa platser, med lämpliga förutsättningar, bland annat i form av förekomst av ytliga subhorisontella sprickor, som har potential för att detta skulle kunna ske vid framtida nedisningar. När det gäller den allmänna glaciala erosionen över Forsmark, så bygger kvantifieringen av historisk och framtida total denudation i Hall et al. (2019a) till stor del på information från isotopanalyser som gjorts för 32 lokaler i Forsmark och närliggande områden i Uppland. Provtagningspunkterna är få jämfört med områdets storlek, speciellt i kombination med den konstaterat stora rumsliga variabiliteten i denudation/erosion (se spannen på glacial erosion redovisad ovan). Ett sätt att erhålla rumsligt heltäckande information om fördelningen och variabiliteten hos den glaciala erosionen, för att till exempel se om punktmätningarna i stort fångat den förväntat största framtida denudationen på platsen, är att genomföra högupplösta numeriska simuleringar av glacial erosion över området. Detta kan göras både för historiska glaciationer, varvid man kan jämföra resultaten från modellen med de oberoende kvantifieringarna av denudation i Hall et al. (2019a), och för framtida glaciationer.

Program

- Avslutning av den pågående studien kring glacial erosion rörande i) glacial ripping, ii) kartering av glaciala erosionsformer på hållar (genom användande av sedan tidigare insamlade lidardata) och iii) analys av potentialen för så kallad bakåtgripande erosion (eng headward erosion) och associerad potentiell framtida lateral tillväxt av område med kraftigare historisk glacial erosion sydost om Forsmark (se Olvmo 2010).
- Förbättrad uppskattning av denudation och glacial erosion av bergytan i Forsmark under de kommande en miljon åren från kosmogent producerade isotoper i berget (^{10}Be , ^{26}Al , ^{14}C , redovisade i Hall et al. 2019a), baserad på ett utökad underlag kring tiden med glaciala förhållanden vid Forsmark under denna period.
- Numerisk modellering av historisk och framtida rumslig fördelning av glacial erosion över Forsmarksplatsen.

13.5 Inlandsisars dynamik och beteende

Nuläge

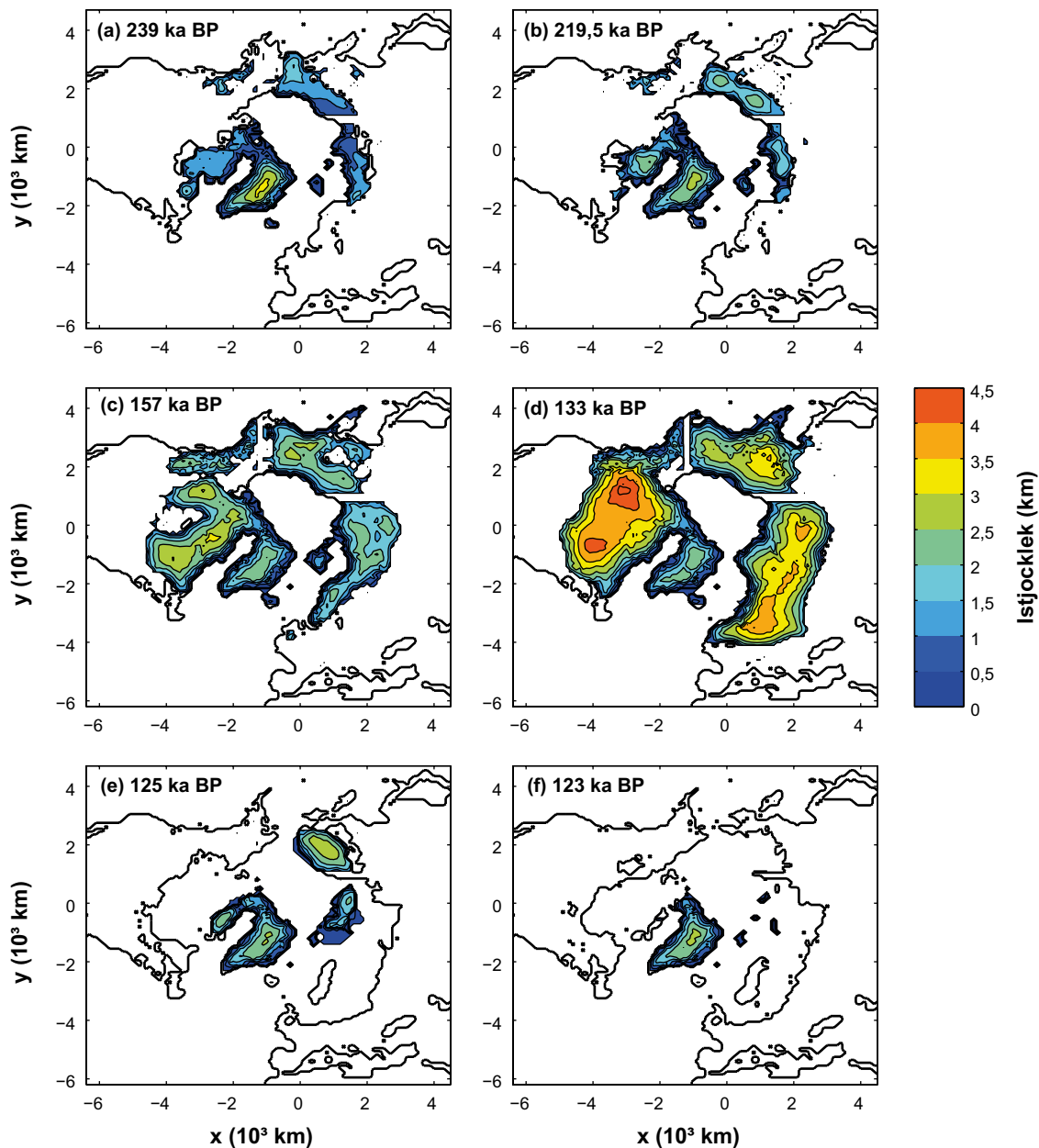
I en pågående studie undersöks hur inlandsisar med olika egenskaper (iskonfiguration, istjocklek, tillväxt/avsmältningshastighet) påverkar spänningsfältet i berggrunden vid Forsmark, se avsnitt 11.1 och 11.3. I detta arbete används dels tidsutvecklingen av inlandsisen som ingår i SKB:s referensglaciation, dels andra inlandsiskonfigurationer. En av dessa är en inlandsisutveckling för perioden med störst inlandsis i Eurasien under de senaste två miljoner åren, vilket skedde under den näst senaste glaciationen kallad Saale (mellan 241 000 och 135 000 år före nutid). En tidsberoende inlandsisutveckling för hela Saaleglaciationen har därför simulerats (Colleoni och Liakka 2020) för att använda som indata till studien av berggrundens spänningsfält. I inlandsissimuleringen användes en numerisk termomekanisk inlandsismodell, som drevs med klimatdata från tre jämviktssimuleringar utförda med en fullt kopplad global cirkulationsmodell av atmosfär och hav. Klimatutvecklingen för tidsperioderna mellan dessa jämviktssimuleringar ansattes med hjälp av geologiska data. I studien utfördes flera känslighetssimuleringar med olika parameterintervall och rumsliga upplösningar.

Resultatet från en av simuleringarna illustreras i figur 13-3. I denna simulering byggs isen långsamt upp under de första cirka 100 000 åren av Saaleglaciationen, varefter en snabb expansion av inlandsisen äger rum fram till glaciationsmaximat runt 133 000 år före nutid. I denna simulering är Forsmark isfritt fram till cirka 20 000 år före det glaciala maximat, varpå isen snabbt expanderar över norra Europa. Vid glacialmaximat är istjockleken över Forsmark i denna simulering drygt 3 500 meter.

Inlandsismodelleringsstudien redovisad i Colleoni och Liakka (2020) används i den pågående studien av hur olika iskonfigurationer påverkar bergspänningar (avsnitt 11.1 och 11.3). Resultaten planeras att nyttjas i kommande analyser av glacialt inducerade skalv.

Program

- Analys av hur snabbt en inlandsis skulle kunna växa och nå Forsmark från att den bildas i norra Skandinavien, samt hur länge iskanten temporärt skulle kunna stanna över Forsmark vid en glaciation eller deglaciation, vilket är av vikt för storleken på grundvattenflöden och för omfattningen av glacialt inducerade spänningar i geosfären (SKB TR-11-01).
- Inga ytterligare inlandsissimuleringar är planerade under Fud-perioden, men skulle kunna bli aktuellt om utvärderingen av SKB:s klimatscenarier (avsnitt 13.1) motiverar detta.



Figur 13-3. Exempel på tidsutveckling hos inlandsisen i simuleringen av Saaleglaciationen (Colleoni och Liakka 2020). Det glaciala maximum uppnås vid 133 000 år före nutid. Kustlinjen skiljer sig från dagens (och att den är olika för alla redovisade tidpunkter) på grund av variationer i jordskorpan vertikala läge och i havsnivå.

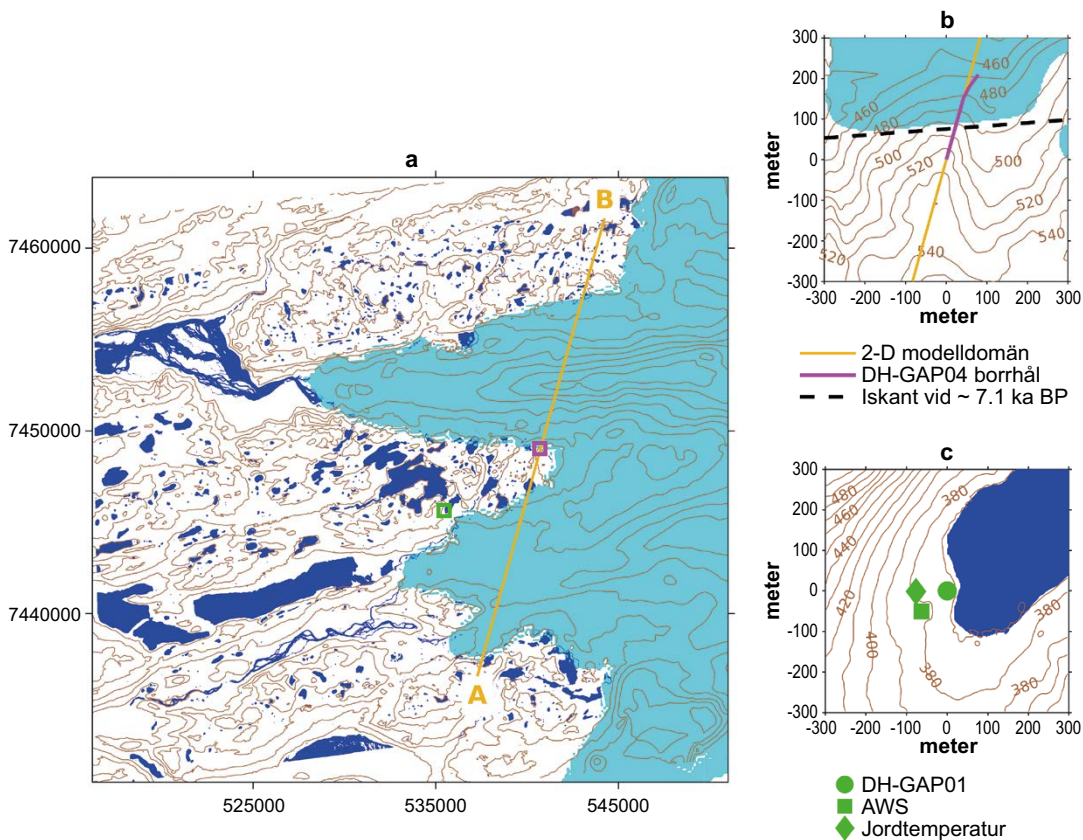
13.6 Utvärdering permafrostmodell

Tillväxt och avsmältning av permafrost är den viktigaste klimatrelaterade processen för ett slutförvar inom det periglaciala klimattillståndet, oavsett typ av avfall och förvarskoncept. Periglacialt klimattillstånd råder under en betydande del (cirka en tredjedel) av tiden i SKB:s referensglaciationscykel för Kärnbränsleförvaret. Analys av möjligheten till frysning av förvarsdelar och vilka effekter detta skulle ha, har gjorts både för Kärnbränsleförvaret (se till exempel SKB TR-11-01) och SFR (se till exempel SKB TR-14-01). Tillväxt av permafrost påverkar även grundvattnets flödesmönster och kemiska sammansättning.

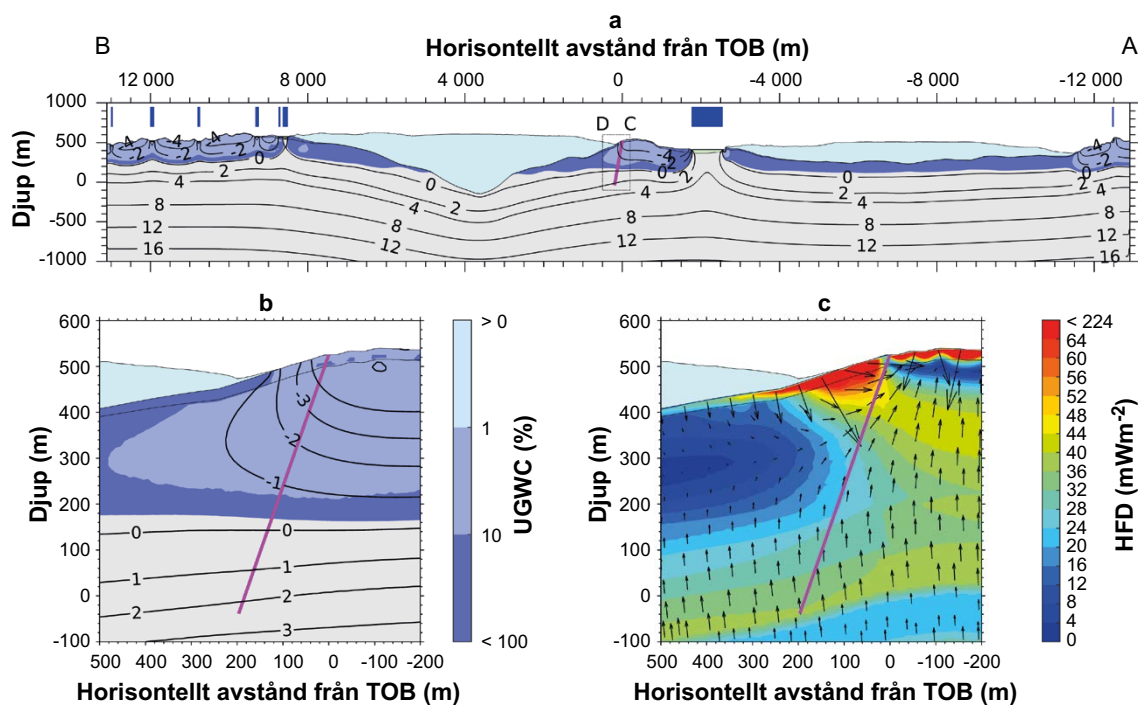
I tidigare Fud-program beskrevs planer och pågående arbete för att utvärdera den permafrostmodell som använts i SKB:s säkerhetsanalyser och säkerhetsvärderingar. Permafrostmodellen har använts för Kärnbränsleförvaret (Hartikainen et al. 2010, SKB TR-10-49, TR-20-12), SFR (Brandefelt et al. 2013, SKB TR-13-05, TR-14-01) och SFL (SKB TR-19-01, TR-19-04).

Nuläge

För att utvärdera tillförlitligheten hos permafrostmodellens beräknade temperaturer i berget, inklusive frys- och permafrostdjup, har beräknade temperaturer från modellen jämförts med observerade temperaturer för platsen för GAP-studien på västra Grönland, där cirka 400 meter djup permafrost finns idag (Claesson Liljedahl et al. 2016, Harper et al. 2016). Detaljerade observationer av bergets temperatur har gjorts i ett 650 meter djupt bergborrhål (DH-GAP04) vid inlandsisens front. Borrhålet penetrerar hela permafrosten och når ner i det ofrusna berget. För denna plats sammanställdes en stor mängd indata på egenskaper hos berg, grundvatten och ytparametrar, och dessa data användes sedan för simuleringar av temperatur och permafrost/frysdjup (för detaljer, se Appendix 2 och 3 i Hartikainen et al. (2022)). Simuleringar av temperaturen i berggrunden genomfördes för en 15 kilometer lång och tio kilometer djup profil vilken passerar platsen för temperaturmätningarna i berget (figur 13-4). Simuleringarna gjordes för en period som omfattar de senaste 115 000 åren och ett stort antal simuleringar genomfördes för att undersöka känsligheten för osäkerheter i indata. Exempel på resultat från simuleringarna ses i figur 13-5. Frusna förhållanden och permafrost råder utanför området med inlandsis, och sträcker sig även någon kilometer in under inlandsisen (figur 13-5a). Berget under de centrala delarna av utlöparglaciären (figur 13-4) är ofruset. I figur 13-5b ses simulerade temperaturer i berget kring borrhålet DH-GAP-04, med den övre delen av borrhålet lokaliserat i fruset berg och den nedre i ofruset berg. Värmeflödets simulerade storlek och riktning ses i figur 13-5c.



Figur 13-4. a) 2D profil som använts vid permafrostsimuleringarna (gul linje) vid platsen för den tidigare GAP-studien (Claesson Liljedahl et al. 2016, Harper et al. 2016). Cyan färg: inlandsis, blå färg: proglaciala sjöar. b) utsträckning hos bergborrhålet DH-GAP04 (magentafärgad linje) i vilket mångåriga detaljerade temperaturmätningar genomförts. Borrhålet börjar i det isfria området nära iskanten och slutar i berget under inlandsisen. 2D modelldomänen är orienterad i samma riktning som inklinationen hos bergborrhålet. Från Hartikainen et al. (2022).



Figur 13-5. a) Exempel på simulering av dagens temperaturfördelning och ofrusen vattenmängd i berget längs den 15 km långa profilen. b) Uppförstoring av området kring bergborrhålet DH-GAP04 (rektangeln i a), c) Simulerat geotermiskt värme flöde och flödesriktning. Inlandsisen är ljusblå och borrhålet DH-GAP04 visas med en lila linje. Mörkblå fält i övre delen av figur a markerar läget för sjöar. Figuren använder en överförhöjning på 2x. TOB = Top of borehole. Från Hartikainen et al. (2022).

Resultaten från utvärderingen visar att de versioner av permafrostmodellen som använts i säkerhetsanalyserna SR-Site och PSAR för Kärnbränsleförvaret (Hartikainen et al. 2010, SKB TR-10-49, TR-11-01, TR-20-12), för säkerhetsanalyserna SR-PSU och PSAR för SFR (Brandefelt et al. 2013, SKB TR-13-05, TR-14-01), och för säkerhetsvärderingen SE-SFL (SKB TR-19-01, TR-19-04), predikterar dagens temperaturfördelning i berget med en felmarginal inom $\pm 1,5$ –2 grader (Hartikainen et al. 2022). Osäkerhetsintervallet härrör både från osäkerheter i indata och från systematiska modellfel. Den senare typen av fel bedöms som litet, se Hartikainen et al. (2022).

Resultaten från studien bidrar även till förståelsen av hur osäkerheter hos nyckelparametrar påverkar permafrostens och frysdjupens tidsmässiga och rumsliga utveckling, för detaljer se Hartikainen et al. (2022). Delar av studien, som rör de paleoklimatkorrektioner som behöver göras av geotermiska data vid den här typen av simuleringar, redovisas även i Colgan et al. (2022).

Resultaten från utvärderingen kommer att användas för att utvärdera de antaganden och slutsatser som dragits i SKB:s analyser av säkerhet efter förslutning från tidigare simuleringar av permafrost och bergtemperaturer för framtida kalla periglaciala perioder i Forsmark. Dessa slutsatser rör exempelvis maximalt frysdjup vid platsen för Kärnbränsleförvaret (se till exempel SKB TR-11-01). I och med de goda modellprediktioner som påvisats i denna studie, förväntas resultaten styrka den metodik och de slutsatser som dragits i säkerhetsanalyserna.

Program

- Inga ytterligare permafrostsimuleringar är planerade under Fud-perioden, men skulle kunna bli aktuellt om utvärderingen av SKB:s klimatscenarier (avsnitt 13.1) motiverar detta.

13.7 Analogier för glacial hydrologi, hydrogeologi och geokemi under glaciala förhållanden

GAP-studien bedrevs mellan åren 2008 och 2013, och därefter har resultaten analyserats och publicerats fortlöpande. De två slutrapporterna från GAP (Claesson Liljedahl et al. 2016, Harper et al. 2016) publicerades under 2016, samtidigt i både SKB:s, Posivas och NWMO:s rapportserier. Dessa två rapporter sammanfattar de data som samlats in kring glacial hydrologi, hydrogeologi, glaciologi, meteorologi, geologi och geokemi från undersökningsområdet på västra Grönland, samt den vetenskapliga förståelse och de konceptuella modeller som studien resulterat i.

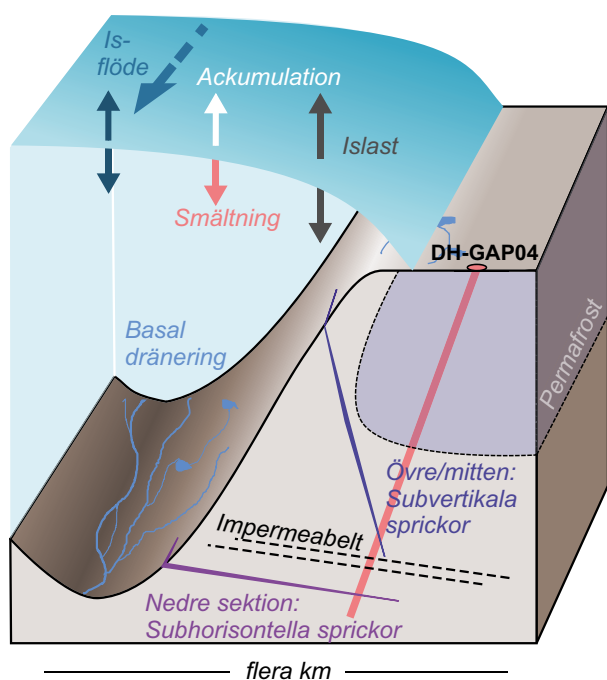
GAP initierades för att öka processförståelsen för hur klimatförändringar, och särskilt glaciationer, kan komma att påverka funktionen hos ett slutförvar och dess omgivning på lång sikt. Projektet har resulterat i en ökad förståelse för en rad olika processer som är av vikt vid analyser av säkerhet efter förslutning, framför allt avseende randvillkor för grundvattenmodellering, bentonitstabilitet och landskapsutveckling.

SKB har tillsammans med Posiva, NWMO och Nagra kompletterat studierna i GAP med en mindre glacialhydrologisk studie (ICE) i samma undersökningsområde på Grönland (Harper et al. 2019). Studien undersökte i) kortvariga, mycket höga, subglaciala tryck, ii) gradienter i tryck vid botten av isen på en skala motsvarande istjockleken, och iii) transmissivitet och infiltrationsförmåga hos berggrunden under isen. Resultaten förbättrade den konceptuella bilden av hydrologin vid övergången mellan is och berggrund (framför allt rörande basalt vattentryck) som erhöles från GAP-studien (Claesson Liljedahl et al. 2016, Harper et al. 2016). Resultaten planeras att användas för förbättrade ytrandvillkor i kommande simuleringar av grundvattenflöde under framtida glaciala perioder vid Forsmark.

Nuläge

Den monitoring av parametrar som under GAP-studien påbörjades i bergborrhålet DH-GAP04 (tryck, temperatur och salinitet ner till KBS-3-förvarsdjup) och insamlingen av meteorologiska data från automatiska väderstationer i en profil upp längs inlandsisen samt vid en station lokaliserad framför inlandsisen, har fortgått under den gångna Fud-perioden. Data från denna monitoring, samt från tidigare insamlade data inom GAP-studien, har använts för analys av hur grundvattenflöde och tryck i berggrunden påverkas av närvaron av inlandsisen (Claesson Liljedahl et al. 2021). Baserat på faktiska observationer visar resultaten för första gången hur hydrogeologin i den kristallina berggrunden påverkas av förändringar hos en långsamt avsmältande inlandsis. Resultaten visar att trycket i berggrunden reagerar mycket snabbt och känsligt på variationer hos inlandsisens hydrologi och massbalans, på dygns-, säsongs- och flerårstidsskala (Claesson Liljedahl et al. 2021). Figur 13-6 visar en konceptuell bild av hur de observerade trycken i bergborrhålet styrs av den lokala geologin (lokala/regionala sprickzoner i berget) i relation till isens och berggrundens topografi. Den nedersta delen av borrhålet (nedre sektion i figuren) verkar ha koppling till de lägst liggande delarna under isen via subhorisontella sprickor, medan de mittersta delarna av borrhålet (övre/mitten i figuren) är kopplade till betydligt grundare delar under isen via subvertikala sprickor. Tryckvariationerna vid botten av isen skiljer sig mycket mellan dessa två områden, vilket återspeglas i de tryck som registreras i olika delar av borrhålet. Resultaten visar således på ett komplext samband mellan det tryck som råder vid botten av isen, inklusive dess rumsliga och tidsmässiga variationer, och en tydlig tryckrespons i berget.

Data på geotermiskt värmefflöde för borrhålet DH-GAP04 (Claesson Liljedahl et al. 2016, Harper et al. 2016) har beräknats av Hartikainen et al. (2022) som en del av arbetet med att utvärdera permafrostmodellen beskrivet i avsnitt 13.6. Dessa geotermiska data (både okorrigerade och korrigerade för variationer i historiska klimat) har inkluderats i en ny sammanställning och analys av alla tillgängliga geotermiska data för Grönland (Colgan et al. 2022). Databasen kommer att utgöra en viktig del i framtida analyser, till exempel av hur den grönländska inlandsisen kan komma att reagera på ett varmare klimat. Databasen med resultat från in situ-mätningar och den griddade modellen över värmefflöde är fritt tillgängliga från GEUS (<https://doi.org/10.22008/FK2/F9P03L>).



Figur 13-6. a) Konceptuell bild av hur inlandsisprocesser kan ge en tryckrespons i grundvattensystemet, observerat i borrhålet DH-GAP04 (röd diagonal linje). Bilden innehåller en tolkning av hur olika delar av borrhålet konnektar till olika platser under inlandsisen (med olika hydraulisk head vid övergången mellan is och berggrund). De variationer som finns i inlandsisens hydrologi (från olika platser under isen), med variationer på dygns-, säsong-, och mångårig tidsskala, återspeglas i de tryckvariationer som observerats i borrhålet. Baserad på Claesson Liljedahl et al. (2021).

Borrhålet DH-GAP04 provtogs senast 2015 för geokemisk analys av grundvattnet. Idag har borrhålet återhämtat sig ytterligare sju år efter borrhållingen av hålet (då vattenkemin påverkades av borrhållingen). Under 2022 genomfördes en vattenprovtagning av DH-GAP04 vid inlandsisens kant för avslutande geokemisk analys (avsnitt 11.4.2). SKB:s installationer på Grönland (bergborrhål, väderstationer, med mera) planeras att övergå i nytt huvudmannaskap.

Program

- Efter de aktiviteter som genomförs under 2022 planerar SKB ingen ytterligare verksamhet vid platsen för GAP-studien på Grönland.

Del III

Avveckling av kärntekniska anläggningar

- 14 Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar
- 15 Planering för avveckling inom Uniper
- 16 Planering för avveckling inom Vattenfall
- 17 Planering för avveckling av SKB:s anläggningar
- 18 Fortsatta aktiviteter inom avveckling

I del III av Fud-program 2022 presenteras planeringen och ansvarsfördelningen för genomförandet av avvecklingen av de svenska kärnkraftsreaktorerna och SKB:s kärntekniska anläggningar. Här ges också en sammanfattning av det utvecklingsarbete som är kopplat till avvecklingen.

14 Förutsättningar för avveckling av kärntekniska anläggningar

I detta kapitel beskrivs översiktligt kravbilden som gäller vid avveckling av kärntekniska anläggningar som anges i SSM:s föreskrifter och i MB. Här redogörs även för hur kravbilden påverkar upplägget av ett generiskt avvecklingsprojekt i form av olika skeden och faser. Vidare redogörs för arbetsfördelningen mellan reaktorinnehavarna och SKB gällande avveckling och omhändertagande av det uppkomna radioaktiva avfallet. I efterföljande kapitel detaljeras beskrivningen av hur arbetet kommer att bedrivas inom respektive koncern och inom respektive avvecklingsprojekt med fokus på strategier och planerade åtgärder.

14.1 Begrepp och krav

Avveckling av en kärnkraftsreaktor omfattar avställningsdrift, eventuell servicedrift samt nedmontering och rivning. Avställningsdrift är verksamheten från det att kärnkraftsreaktorn slutgiltigt ställs av till dess att allt bränsle avlägsnats från anläggningen. I de fall nedmontering och rivning inte kan inledas omedelbart efter avställningsdriften, vidtar en period av servicedrift under vilken anläggningen underhålls i väntan på att nedmontering och rivning kan påbörjas.

Under nedmontering och rivning pågår aktiviteter för att omhänderta de radioaktivt kontaminerade anläggningsdelarna i form av processystem, byggnader och eventuell kontaminerad mark. Nedmonterings- och rivningsfasen avslutas då anläggningen nått ett tillstånd som gör den möjlig att friklassa. När SSM godkänt en ansökan om friklassning befrias verksamheten vid anläggningen från skyldigheter enligt KTL och strålskyddslagen (SSL). Anläggningen upphör därigenom att beaktas som kärnteknisk, vilket innebär att resterande rivning och återställande av mark kan ske utan restriktioner enligt KTL och SSL.

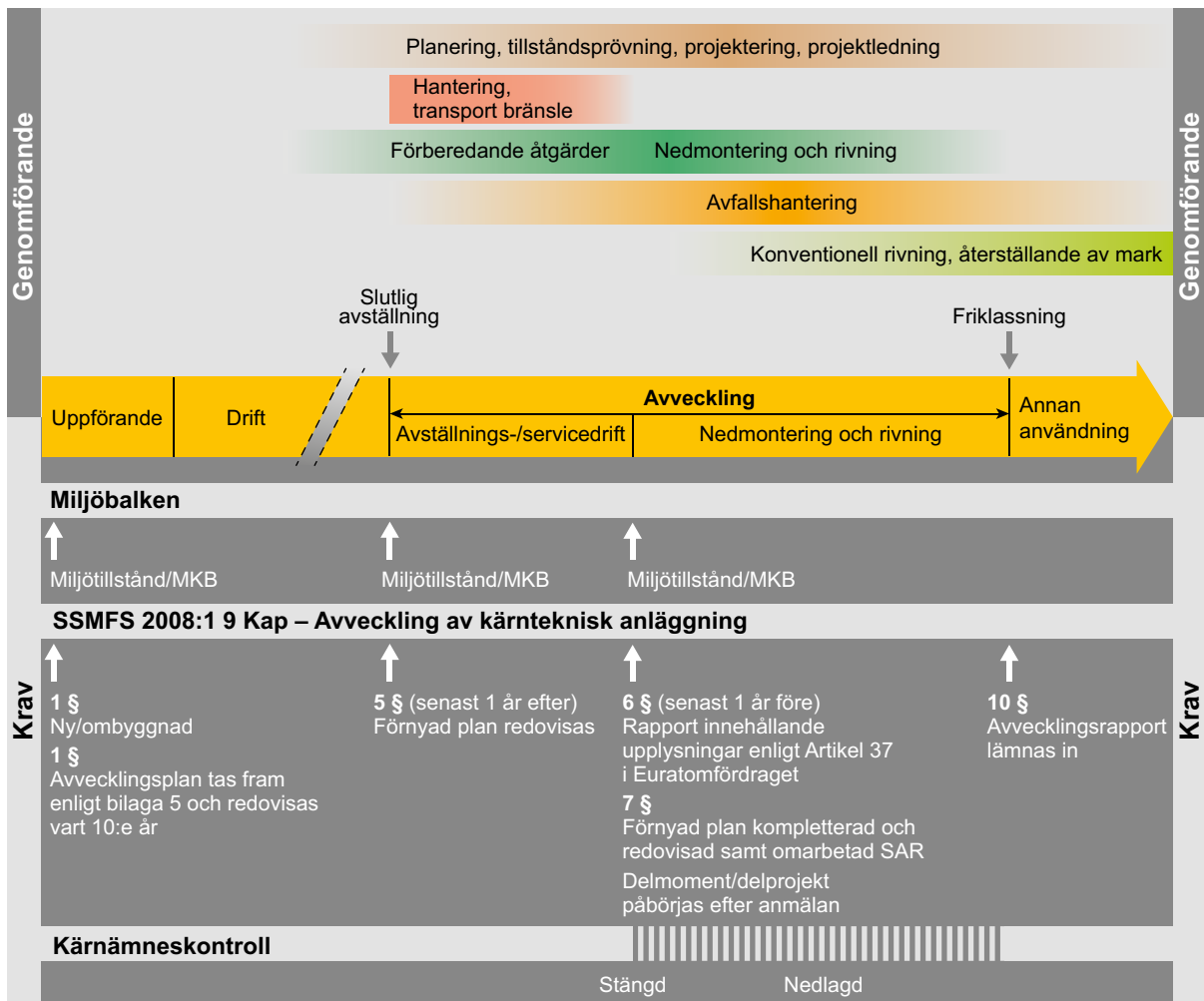
Figur 14-1 visar schematiskt hur avvecklingen av en kärnkraftsreaktor genomförs i förhållande till den kravbild som finns på anläggningen under dess livscykel. Figurens övre del presenterar de aktiviteter som planeras att ske på anläggningen och den undre delen visar kraven enligt MB och SSM:s föreskrifter.

De huvudsakliga tillståndprocesserna som styr ett avvecklingsprojekt är: miljötillstånd enligt MB samt godkännande enligt KTL och SSL. Enligt MB ska en MKB lämnas in både innan slutlig avställning av anläggningen och som en del i ansökan om att få utföra nedmontering och rivning, se figur 14-1. I samband med slutlig avställning väntas den befintliga MKB:n kunna omarbetas då avställnings- och servicedrift till stor del kommer att likna den tidigare driften. Inför nedmontering och rivning krävs däremot att en ny och ändamålsenlig MKB tas fram. MKB:n tillsammans med samråd utgör grunden för miljötillstånd enligt MB.

I enlighet med KTL och SSL samt gällande förordningar, tillståndsvillkor och föreskrifter ska bland annat följande dokument utarbetas inför och i vissa fall löpande under genomförandet av avvecklingen:

- Avvecklingsplan och avvecklingsstrategi.
- Avfallsplan.
- Säkerhetsredovisning.
- Underlag enligt Euratomfördragets artikel 37.
- Delmoment-/delprojektanmälan.
- Avvecklingsrapport.
- Kontrollprogram för friklassning.

Avvecklingsplanen ska redovisas för SSM, medan avfallsplan och säkerhetsredovisning ska delges för formellt godkännande enligt SSMFS 2008:1. Vidare ska även underlag tas fram för information till Europeiska kommissionen i enlighet med Euratomfördragets artikel 37. Den formella rapporten skickas till Europeiska kommissionen av SSM, men respektive avvecklingsprojekt tar fram underlagsrapporter.



Figur 14-1. Översikt över de olika faserna för genomförandet av en reaktors avveckling samt SSM:s och MB:s krav för avveckling under en kärnteknisk anläggnings livslängd.

Under nedmontering och rivning krävs anmälan av de åtgärder som kommer att vidtas i anläggningen. Dessa fördelas rent praktiskt i olika delmoment/delprojekt som anmäls successivt allteftersom avvecklingen fortskrider. Varje delmomentsanmälan ska innehålla uppgifter om bland annat skyddsåtgärder, teknikval och riskbedömningar och ska formellt säkerhetsgranskas.

När nedmontering och rivning är slutförd ska en avvecklingsrapport, som beskriver erfarenheter från avvecklingen och anläggningens sluttillstånd, lämnas till SSM.

Under avvecklingen finns även krav på rapportering för kärnämneskontroll. Rapporteringen omfattar bland annat bokföringsrapporter, upprättande av aktivitetsprogram samt årlig uppdatering av områdesbeskrivning. Krav på rapportering upphör efter skriftlig bekräftelse från SSM om att anläggningen uppnått status ”nedlagd anläggning” enligt förordning (Euratom) nr 302/2005.

Utöver ovanstående krav finns även avvecklingsrelaterade krav utfärdade av andra kravställare. Dessa krav, som inte beskrivs närmare i detta dokument, inkluderar bland annat lagar och förordningar som övervakas av Miljödepartementet, Arbetsmiljöverket, MSB, Transportstyrelsen och berörd kommuns byggnadsnämnd.

Avvecklingen av de svenska kärnkraftverken påverkas därutöver av deras planerade drifttider och tillgänglighet av mellanlager och slutförvar för rivningsavfall. Den övergripande planeringen redovisas i avsnitt 3.5 och detaljeras nedan.

14.2 Ansvar och arbetsfördelning

Tillståndshavaren för en kärnteknisk anläggning har ansvaret för avvecklingen enligt KTL, SSL, finansieringslagen och SSM:s föreskrifter. För det radioaktiva avfallet sträcker sig ansvaret tills att det är friklassat eller tills att SSM har godkänt slutlig förslutning av aktuellt slutförvar och regeringen beslutat om befrielse från ansvar enligt 10 § KTL.

Vattenfall AB är huvudägare för Ringhals AB och Forsmarks Kraftgrupp AB. Uniper (legalt namn Sydkraft Nuclear Power) är huvudägare för OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB. Tillståndshavare för kärnkraftsreaktorerna är Barsebäck Kraft AB (Barsebäck 1–2), Forsmarks Kraftgrupp AB (Forsmark 1–3), OKG Aktiebolag (Oskarshamn 1–3) respektive Ringhals AB (Ringhals 1–4). För Ågestareaktorn är Vattenfall AB tillståndshavare. SKB ansvarar för Clab och SFR samt de kommande anläggningarna Clink, Kärnbränsleförvaret och SFL. För att det kärntekniska tillståndet ska gå över till någon annan krävs ett regeringsbeslut.

För att effektivisera arbetet med avvecklings- och avfallsfrågor har arbetsområden fördelats mellan olika aktörer på såväl företagsnivå som på koncernnivå. De industrigemensamma åtagandena inom hantering av avfallet utförs i normalfallet koordinerat från SKB, medan det inom de två industrikoncernerna, Vattenfall och Uniper, varierar något hur avvecklingsrelaterade frågor hanteras. Detta avsnitt beskriver arbetsformerna och fördelningen av arbetsuppgifter.

14.2.1 Arbetsfördelning mellan tillståndshavare och SKB

Tillståndshavaren har ansvar för att avveckla sina kärntekniska anläggningar. SKB:s huvuduppgift är att få till stånd slutförvar för rivningsavfall enligt tillståndshavarnas behov. SKB sammanställer det utvecklingsbehov som identifierats av tillståndshavarna, samordnar generella metoder och rutiner för transport och slutförvaring av radioaktivt avfall samt sammanställer de avvecklingsrelaterade kostnaderna som inrapporteras från tillståndshavarna.

Enligt KTL ska reaktorinnehavarna i samråd utarbeta ett program för den forsknings- och utvecklingsverksamhet samt de övriga åtgärder som behövs för att hantera och slutförvara kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla kärnkraftverken. Det är SKB som på uppdrag av reaktorinnehavarna, och i samarbete med dessa, utarbetar Fud-programmen och inkommer med dem till SSM, se avsnitt 1.2.

Generella metoder och rutiner för rivningsarbete

SKB har i uppdrag att samordna de generella metoder och rutiner för transport och slutförvaring av radioaktivt avfall som behövs för avvecklingsarbetet. Uppgifter som SKB svarar för är bland annat att ta fram typbeskrivningar som beskriver hur avfallet uppfyller de acceptanskriterier som gäller i respektive slutförvar. Avfallsproducenten tar fram typbeskrivningsspecifikationer som utgör underlag till typbeskrivningen som även är del i avfallsproducenternas SAR. De ska visa hur avfallet uppfyller acceptanskriterier för tillverkning och mellanlagring på anläggningen. Vidare har SKB i uppgift att gemensamt för reaktorinnehavarna vid behov utveckla nya avfallsbehållare samt komplettera transportsystemet med tillhörande avfallstranportbehållare.

För att uppnå en optimal nationell samordning, har reaktorinnehavarna kommit överens om uppgifter som SKB samordnar i anknytning till avfallshantering, exempel på detta har varit framtagande av guideline och gemensamma riktlinjer för friklassning (SKB R-11-15, Berglund et al. 2016), gemensam mall för inrapportering av prognostiserat rivningsavfall (Ahlford 2021) samt riktlinjer för redovisning av avvecklingsplaner (Calderon 2014).

Respektive reaktorinnehavare ansvarar för det kommande rivningsinventariet, medan SKB ansvarar för att sammanställa inventariet med tanke på planeringsbehov av SFL samt utbyggt SFR. Reaktorinnehavarna och SKB samarbetar för att välja en säker hanteringslösning som uppfyller myndighetskrav och som i sin helhet är optimerad för hela avfallskedjan – från rivning genom karakterisering, paketering, mellanlagring och transport av avfallet till slutlig deponering för olika typer av rivningsavfall.

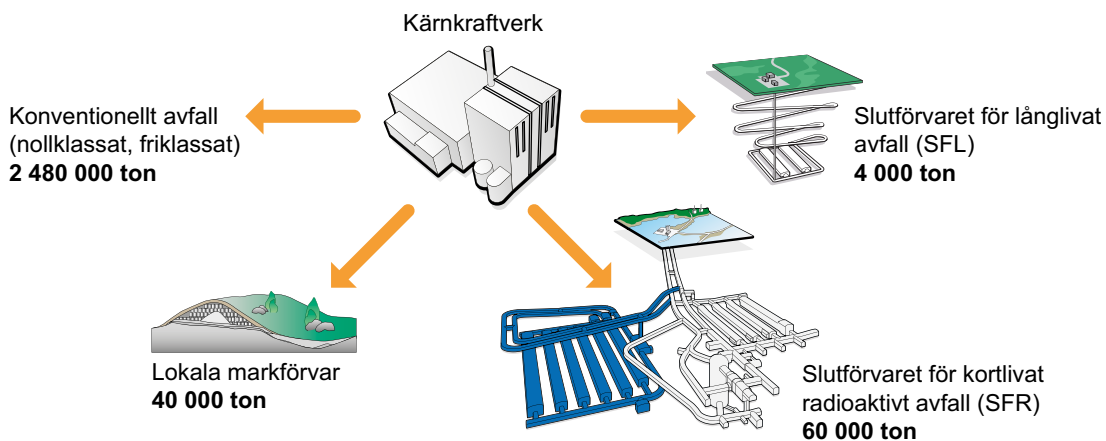
I syfte att ytterligare optimera avfallshanteringen på nationell nivå, pågår ett arbete med att stärka SKB:s samordnande roll.

Avfall under nedmontering och rivning

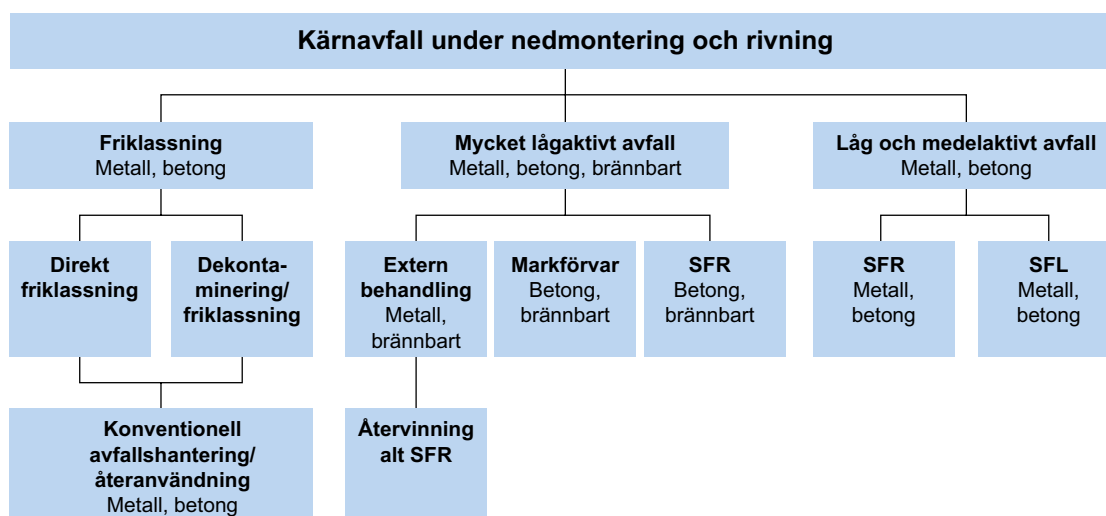
Under nedmontering och rivning av ett kärnkraftverk uppstår stora mängder avfall. Avfallet är av samma typ som det avfall som uppstår under drift, med skillnaden att volymerna kommer vara större. Avfallet kommer från olika delar av anläggningen och därmed är det stora variationer i radioaktiv föroreningsgrad. Nivån på föroreningsgrad är det som avgör den efterföljande hanteringen, slutlig avbördningsväg eller omhändertagande för avfallet.

Merparten av avfallet kan hanteras som konventionellt avfall, då det härrör från anläggningsdelar där radioaktivt material inte har hanterats eller där det historiskt inte detekterats någon kontamination. Detta avfall benämns som nollklassat avfall, vilket innebär att hanteringen föregåtts av en initial bedömning där avfallet kategoriserats som extremt liten risk för förorening (ELR). Inom den konventionella avbördningsvägen ingår även avfall som har friklassats. Friklassning av avfall sker då kontaminationsnivån i avfallet understiger gällande friklassningsgränser. Kategorisering av avfall finns beskrivet i rapporten SKB (R-11-15) och i Berglund et al. (2016).

Avfall som inte kan nollklassas eller friklassas, sorteras efter lämplig avbördningsväg. En sammanställning över prognostiserat rivningsavfall från de svenska kärnkraftverken per avbördningsväg samt huvudsakliga principer för avbördningsvägar av kärnavfall under nedmontering och rivning, presenteras i figur 14-2 och 14-3. Sammanställningen i figur 14-2 ger en överblick över hur fördelning och proportioner av avfall mellan olika avbördningsvägar ser ut.



Figur 14-2. Sammanställning över prognostiserat rivningsavfall från de svenska kärnkraftverken och olika avbördningsvägar.



Figur 14-3. Kärnkraftverkens huvudsakliga principer för avbördningsvägar för kärnavfall under nedmontering och rivning.

Kostnader för avveckling

Reaktorinnehavarna är enligt KTL skyldiga att svara för kostnaderna för de åtgärder som behövs för att omhänderta kärnavfallet och det använda kärnbränslet samt för att avveckla anläggningarna. På uppdrag av reaktorinnehavarna tillser SKB vart tredje år att en kostnadsberäkning, den så kallade planrapporten, tas fram enligt finansieringslagen, se avsnitt 1.3. Inbetalda medel förvaltas av statliga Kärnavfallsfonden.

Reaktorinnehavarna tar fram kostnadsuppskattningar för avveckling av respektive kärnkraftsreaktor och översänder dessa till SKB. SKB sammanställer uppskattningarna och tar fram en sammantagen kostnadsuppskattning samt osäkerhetsanalys, vilka sedan ligger till grund för de avgifter och finansieringsbelopp som regeringen beslutar om.

Transportsystemet

SKB ansvarar för transport av använt kärnbränsle och kärnavfall från kärnkraftverken till mellanlager och slutförvar. Transportsystemet består av ett fartyg, specialfordon och olika typer av transportbehållare, se avsnitt 2.3. Fartyget och fordonen används både för transporter av låg- och medelaktivt avfall och för använt kärnbränsle. De olika transportbehållarna är specifikt utvecklade för respektive avfallstyp. I det fall nya transportbehållare behöver utvecklas, ansvarar SKB för genomförandet.

Kärnavfall kan, i de fall detta anses motiverat, transporteras utanför SKB:s system. Detta kan exempelvis gälla större komponenter och avfall som ska behandlas hos extern part.

14.3 Nationell och internationell samordning

14.3.1 Industrigemensam samordning

Ur en nationell synvinkel behövs en samordning av avvecklingsfrågorna, både inom kärnkraftsföretagen och mellan kärnkraftsföretagen och SKB samt övriga tillståndshavare för att kunna säkerställa att hela kedjan från avvecklingsplanering till slutförvaring av avfallet sker på ett optimalt sätt. Olika forum finns för att stödja detta, där även en del internationella forum är betydelsefulla.

På nationell nivå finns SKB:s Fud- och plangrupp där reaktorinnehavarna ingår. I gruppen sker samordning av SKB:s arbete med Fud-programmen och planrapporterna.

För att ytterligare stödja linjechefer inom SKB och reaktorinnehavarna rörande avveckling och avfallshantering, finns ett forum för avfallschefer etablerat där SKB är sammankallande. Där finns möjligheten att fatta beslut inom deltagarnas mandat för, att få fokus på viktiga frågor och prioritera bland det arbete som SKB och reaktorinnehavarna bedriver.

I samband med tidigare lagd stängning av reaktorerna i Oskarshamn och Ringhals har ett utökat behov av samarbete och samordning uppstått inom avvecklingsplanering, inte minst inom koncernerna Vattenfall och Uniper, men även mellan reaktorinnehavarna och SKB. Samarbetena omfattar exempelvis mellanlagring av avfall i väntan på att planerade slutförvar är i drift och att optimera hanteringen av vissa avfallsfraktioner.

SKB, reaktorinnehavarna samt Business Unit Nuclear Decommissioning (BUND) inom Vattenfall deltar även i internationella forum inom området avveckling som arrangeras av bland annat IAEA, OECD/NEA respektive EU-kommissionen. Samverkan sker bland annat genom deltagande i OECD:s samarbetsorganisation för kärnenergifrågor NEA och Eurad. Inom NEA sker deltagande i Committee on CDLM, som består av företrädare från myndigheter och avfallsorganisationer samt i grupper under CDLM, se även avsnitt 5.6.3. Deltagande i Eurad och dess aktiviteter handlar bland annat om att inhämta och dela erfarenheter inom avfall- och avvecklingsområdet mellan länder i Europa.

Avvecklingsprogrammen inom Vattenfallkoncernen (Vattenfall/Ågesta och Ringhals) är medlemmar i OECD/NEA:s Co-operative Programme for the Exchange of Scientific and Technical Information concerning Nuclear Installation Decommissioning Projects (CPD) med dess undergrupp Technical Advisory Group (TAG). Programmet syftar till att underlätta utbyte av information och erfarenheter vid avveckling av kärntekniska anläggningar. Utbytet främjar tillämpningen av säkra, miljöanpassade och kostnadseffektiva metoder i avvecklingsprojekten.

14.3.2 Samordning Uniper

Under 2020/2021 har Uniper och Fortum utvecklat en gemensam strategi kring rivning och avveckling av kärnkraftverk. Ett konsortium, med namnet Fortum-Uniper Nuclear Service, har etablerats och under mitten av 2021 har detta kontrakterats för det tekniska genomförandet av rivning och avveckling hos OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB.

Kontrakteringen medför att OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB har vardera en sammanhållen upphandling med konsortiet. Konsortiet i sin tur hanterar alla de ingående arbetspaketen som omfattas.

Konsortiet svarar för att koordinera och utföra avvecklingen av de avställda reaktorerna. Arbetet sker på uppdrag från tillståndshavarna på OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB som ansvarar för att verksamheten på anläggningarna följer det tillstånd som är aktuellt.

Unipers avvecklingsprogram omfattar avvecklingen av OKG Aktiebolags och Barsebäck Kraft AB:s anläggningar. Arbetsfördelningen finns beskriven i respektive tillståndshavares avvecklingsstrategi och avvecklingsplaner. Där framgår att Uniper har som mål att koordinera och utföra avvecklingen av de avställda reaktorerna Barsebäck 1, Barsebäck 2, Oskarshamn 1 och Oskarshamn 2.

Tillståndshavarna OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB har anpassat organisationerna för att bistå konsortiet i rivnings- och avvecklingsarbetet. De kärntekniska tillstånden ligger kvar hos OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB och ansvaret för avvecklingen och kärnavfallet kvarstår oförändrat hos tillståndshavarna.

Vid sidan av aktiviteterna kopplade till avveckling av de avställda reaktorerna, agerar ägarbolaget inom Uniper i flera samverkansforum för att ge stöd för branschens utveckling.

Inom Uniper möts ägarbolaget, OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB för att hantera frågeställningar för att underlätta den pågående avvecklingen. Utanför koncernen samverkar Uniper med Vattenfall och då huvudsakligen i syfte att stödja SKB i industrins totala utmaningar kopplat till bland annat avveckling och avfallshantering (back-end). Slutligen kan nämnas att Uniper aktivt deltar i forum där SKB behöver ägarnas stöd exempelvis inom avfallsområdet.

14.3.3 Samordning Vattenfall

All avveckling inom Vattenfallkoncernen samordnas genom BUND. Det skapar bra förutsättningar för synergieffekter mellan det idag avslutade avvecklingsarbetet vid R2-reaktorn i Studsvik, det pågående avvecklingsarbetet av Ågestareaktorn och det nära förestående arbetet med att avveckla Ringhals 1 och Ringhals 2. Dessutom skapas förutsättningar för utveckling och samordning mellan avvecklingen i Tyskland och Sverige.

Avvecklingen av Ringhals 1 och Ringhals 2 samordnas i ett avvecklingsprogram som gemensamt styrs av tillståndshavaren Ringhals AB och BUND.

Inom Vattenfall bedrivs koncernintern samverkan inom olika områden. Strategiskt forum för avfallshantering och avveckling (Strata) har bildats för att säkerställa att olika verksamheters strategier och planer för avveckling och avfallshantering samordnas och optimeras. Detta utifrån olika aspekter såsom säkerhet, myndighetskrav, kostnadseffektivitet och andra externa och interna intressenters krav.

Samverkan sker också på operativ nivå inom avfalls- och avvecklingsområdet, till exempel vad gäller friklassning, avfallsdokumentation och generellt erfarenhetsutbyte.

14.4 Kompetens

Avveckling av kärntekniska anläggningar i Sverige kommer pågå ända fram till 2070-talet, då anläggningarna för omhändertagande av använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall börjas avvecklas. Avvecklingen kommer inte ske i ett jämt flöde utan kommer, enligt nuvarande planering, genomföras i tre huvudsakliga etapper: en på 2020-talet (nu), en på 2040-talet och den slutliga på 2070-talet. En utmaning är därmed att säkerställa tillgång till kompetens för alla tre avvecklingsetapperna, eftersom behovet av avvecklingskompetens mellan etapperna kommer vara begränsat i Sverige. Se även avsnitt 5.6.4.

Att säkra kompetens inom området kommer vara en för bolagen strategiskt viktig fråga, på både kort och lång sikt. Inom landet kommer ett samarbete med universitet och högskolor vara en del i den långsiktiga kompetensförsörjningen, liksom att fortsätta uppmuntra samarbete inom branschen för att både behålla och attrahera ny personal inom dessa områden. Etableringen av Nordic Nuclear Trainee Program (NNTP) är ytterligare ett steg för att möta kommande behov.

Nuläge

En nyckel för att klara den första etappen är att arbeta strukturerat med kompetensuppbyggnad och erfarenhetsåterföring inom avvecklingsområdet. En viktig del är att bevara den nyckelinformation och -kompetens, som erhållits vid de tidiga avvecklingsprojekten, genom att den dokumenteras och kan därmed nyttjas i kommande etapper.

På motsvarande sätt är det betydelsefullt att ha ett löpande utbyte inom och mellan bolagens tyska respektive svenska verksamheter, i syfte att säkerställa överföring av relevanta (då avvecklingsprojekten har olika förutsättningar) erfarenheter och lösningar för en säker och effektiv avveckling. Bolagen har etablerade kontakter med internationella leverantörer med betydande erfarenhet av praktisk avvecklingsverksamhet. Dessutom har olika former av samverkan initierats med syfte att inhämta och bygga upp kompetens.

På dessa sätt möjliggörs att erfarenheter och kompetens successivt byggs upp och säkras inom branschen till slutfasen av den första avvecklingsetappen.

Ett annat exempel är den utbildningsverksamhet inom området back-end som branschen etablerat inom KSU.

Program

En viktig beståndsdel i arbetet med att säkra kompetens till kommande etapper av avvecklingen är, att nogsamt och strukturerat dokumentera de praktiska erfarenheter som bolagen gör under avvecklingen, att tydligt beskriva hur organisation och styrning lämpligen bör utformas beroende på arbetsuppgiften, hur en anläggning i drift bäst kan förberedas inför rivning till exempel vad gäller dokumentation, vilka olika former av avvecklingskoncept som finns, vilka erfarenheter som finns kopplat till dessa samt vilka koncept som fungerar relaterat till olika typer av anläggningar och i olika kontext. Förenklat kan detta sammanfattas med att efter att denna avvecklingsetapp är avslutad, har branschen etablerat ett arbetssätt över hur avveckling bäst planeras, styrs och genomförs med hänsyn till säkerhet och effektivitet.

Utöver detta är det givetvis kritiskt att anläggningskännedom samt formell kompetens inom till exempel strålskydd långsiktigt säkerställs. Detta kräver såväl ett branschgemensamt samarbete som en samverkan med utbildningsväsendet. En del i detta är också SSM:s nationella strategi för Sveriges kompetensförsörjning inom strålsäkerhetsområdet.

Ett exempel på ett branschgemensamt samarbete är SKC, en centrumbildning där SSM, kärnkraftverken och Westinghouse Electric Sweden AB tillsammans med KTH, Chalmers och Uppsala universitet sedan 27 år stödjer utbildning, forskning och utveckling inom kärntekniska tillämpningar vid högskolor och universitet i Sverige.

Det är slutligen viktigt att notera att även om behovet av avvecklingskompetens inom Sverige kommer att vara begränsat mellan avvecklingsetapperna, kommer det internationellt att pågå avvecklingsverksamhet i stor skala och under lång tid. Därmed kommer behovet av kompetens att vara stort över tid, vilket innebär att motivet att etablera och bevara kompetens kommer att vara betydande, vilket med hög sannolikhet innebär att relevant kompetens kommer att finnas tillgänglig internationellt under hela den svenska avvecklingsperioden.

15 Planering för avveckling inom Uniper

Uniper har sedan beslutet togs om avveckling av de avställda reaktorerna Barsebäck 1 (B1), Barsebäck 2 (B2), Oskarshamn 1 (O1) och Oskarshamn 2 (O2), utvecklat strategin för avvecklingen ytterligare. Under 2020 och 2021 har Uniper och Fortum etablerat ett konsortium (Fortum-Uniper Nuclear Service) som under mitten av 2021 kontrakterades för det tekniska genomförandet av avvecklingen hos OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB.

Konsortiet genomför avvecklingsprogrammet säkert och kostnadseffektivt genom att identifiera och tillvarata synergier och låta rivningssekvensen omfatta båda anläggningarna. Förhållningssättet ger erfarenheter som kommer till nytta både avseende fortsatt planering och fortsatt genomförande. Den tekniska sekvensen är uppbyggd för att skapa flexibilitet.

Konsortiet har för avsikt att genomföra avveckling och tillhandahålla tjänster även för intressenter utanför koncernen. Aktiviteterna kommer att ske parallellt med den kontrakterade avvecklingen inom koncernen. Det är Unipers förhoppning att den externa affären blir framgångsrik och möjliggör att även Oskarshamn 3 (O3) och resterande Oskarshamn 0 (O0, gemensamma anläggningar) kan få stöd från konsortiet.

I det fall O3 och resterande O0 avvecklas senare än nuvarande planering, eller om konsortiet upphört innan avveckling blir aktuell, kommer Uniper att verka för att erfarenheter från den tidigare rivningen bevaras och kan återanvändas när avvecklingen påbörjas.

15.1 Barsebäck Kraft AB:s planering för avveckling

Barsebäckverket är beläget på Barsebäckshalvön i Kävlinge kommun, cirka 20 kilometer norr om Malmö. Det ägs och förvaltas av Barsebäck Kraft AB. Barsebäckverket producerade el under åren 1975–2005. Reaktor B1 har varit permanent avställd sedan 1999 och reaktor B2 sedan 2005, se Figur 15-1.

Övergripande planering

Barsebäck Kraft AB påbörjade nedmontering och rivning av B1 och B2 under 2020. Innan arbetet påbörjades hade förberedande åtgärder enligt gällande tillståndsvillkor genomförts. Erforderliga tillstånd erhöles under 2019. Under genomförandet av nedmontering och rivning, anmäls de olika arbetspaketen/delmomenten stegvis enligt gällande tillståndsvillkor.

Den genomförda och fortsatta planeringen av avvecklingen av B1 och B2 bygger på att använda beprövad teknik och beprövade metoder. Tekniska, säkerhetsmässiga och organisatoriska beroenden har identifierats och därefter har en sekvens för arbetspaketen/delmomenten fastställts. Utifrån den genomförs successivt detaljplanering och upphandling för respektive arbetspaket/delmoment. Utgångspunkten för arbetssättet är att minska tekniska och säkerhetsmässiga risker. Under avvecklingen agerar Barsebäck Kraft AB som en beställarorganisation.

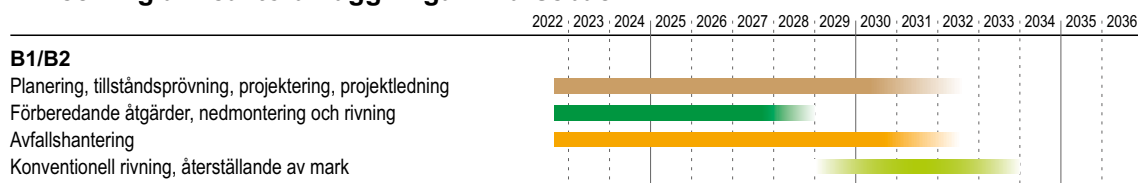
I Figur 15-2 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Barsebäcks kärnkraftverk.

Dekontaminering och friklassning av byggnader planeras att vara genomförd 2028. Konventionell rivning och iordningställande av mark sker i anslutning till att det radioaktiva avfallet transporteras till SFR.



Figur 15-1. Barsebäcksverket sett söderifrån med mellanlager i förgrunden med Barsebäck 1 och Barsebäck 2 i bakgrunden. Foto: Apelöga.

Avveckling av reaktoranläggningar i Barsebäck



Figur 15-2. Principiell översikt av Barsebäck Kraft AB:s tidsplan för avveckling.

Avfallshantering

Material och avfall som uppkommer i samband med avvecklingen är av samma typ som det som uppkommer under drift, med skillnaden att volymerna är större under avvecklingen. Hanteringslinjer för radiologiskt och friklassningsbart avfall är etablerade. Material- och avfallslogistiken är dimensionerad efter rivningssekvensen och den radiologiska kartläggningen. Det finns redundans i hanteringslinjerna för att minska risken för störningar i avfallslogistiken, se figur 14-3. Val av avbördningsväg baseras på en samlad bedömning av faktorer, bland annat kostnad, risk, miljö och Alara-principer.

Då avvecklingen av B1 och B2 genomförs innan utbyggt SFR är i drift har, Barsebäck Kraft AB byggt ett mellanlager för det lågaktiva radioaktiva avfallet. För det långlivade radioaktiva avfallet som mellanlagras i befintligt lager i väntan på SFL, undersöks alternativ med extern mellanlagring.

Barsebäck Kraft AB avser inte att etablera något markförvar, eftersom den kärntekniska verksamheten ska upphöra och området ska friklassas i sin helhet. Möjligheten att använda OKG Aktiebolags markförvar planeras som ett alternativ till att deponera avfallet i utbyggt SFR.

Uppskattade avfallsmängder från avvecklingen har redovisats i avvecklingsplan respektive avfallsplan och en mer detaljerad redovisning finns i respektive delmomentsredovisning. Redovisade avfallsmängder per avfallstyp och aktivitetskategori baseras på resultat från den radiologiska kartläggningen som kommer att uppdateras löpande under rivningen.

15.2 OKG Aktiebolags planering för avveckling

OKG Aktiebolag äger kärnkraftsreaktorerna O1, O2 och O3 samt ett antal gemensamma serviceanläggningar som benämns O0. Förlägningsplatsen för reaktorerna är belägen på Simpevarpshalvön intill Östersjön, omkring 30 kilometer nordost om Oskarshamn. Alla tre reaktorerna är kokvattenreaktorer (BWR), se Figur 15-3.

År 1966 gavs tillstånd att uppföra O1. Anläggningen fasades in på kraftnätet första gången 1971 och invigdes 1972. 1969 gavs tillstånd att uppföra O2, som togs i drift 1974 och O3 togs i drift 1985. O1 och O2 är belägna intill varandra, medan O3 är belägen något mer norrut. O1 ställdes slutligt av sommaren 2017. Efter att O2 genomgått ett omfattande moderniseringsprogram, togs beslut om att inte återstarta anläggningen och den slutliga avställningen fastställdes till slutet av 2015. På O3 pågår effektdrift. Genomförandet av avvecklingen av OKG Aktiebolags kärntekniska anläggningar beskrivs i gällande avvecklingsstrategi och respektive avvecklingsplaner.

Övergripande planering

Den genomförda och fortsatta planeringen av avvecklingen av O1 och O2 hanteras som stora projekt, där standardiserade planeringsprocesser baserade på Lean-principer tillämpas (Lean – metodik för att maximera nytta och minimera slöseri). Tekniska, säkerhetsmässiga och organisatoriska beroenden har identifierats, varefter en sekvens för genomförandet av de olika arbetspaketen har fastställts. Detaljplaneringen för nedmontering och rivning byggs därefter upp successivt för respektive arbetspaket/delmoment. Utgångspunkten för arbetssättet är att minska tekniska och säkerhetsmässiga risker. Under avvecklingen avser OKG Aktiebolag att utgöra en beställarorganisation.

O3 planeras att drivas fram till 2045. Därefter planeras nedmontering och rivning inledas parallellt med att anläggningen töms på bränsle. Vid tidpunkten för avveckling av O3 förväntas en industrialisering av nedmonterings- och rivningsarbetet ha skett, eftersom ett flertal avvecklingsprojekt då har genomförts. Detta, tillsammans med erfarenheter från avvecklingen av O1 och O2, ger förutsättningar för en optimerad avveckling av O3. Avvecklingsplaneringen för O3 och O0 kommer att fortsätta under pågående drifttid enligt ordinarie rutiner, där erfarenheter från avvecklingen av O1 och O2 samt den gemensamma avfallsanläggningen (OAVF) tas tillvara.

Beträffande avveckling av de gemensamma anläggningarna tillhörande O0 är planen att OAVF avvecklas i samband med avvecklingen av O1 och O2. Övriga anläggningar inom O0 kommer att avvecklas i anslutning till avvecklingen av O3.

Första etappen, 2046, avser sådana anläggningar som inte krävs för avvecklingen av O3. Nästa etapp avser återstående anläggningar och rivs i anslutning till rivning av O3. Återställning av samtliga anläggningsplatser sker 2050–2055, på ett sådant sätt och i sådan omfattning att annan industriell verksamhet kan etableras. Konventionell rivning inklusive rivning av reaktorbyggnaderna för O1 och O2 samt återställning av mark sker i anslutning till rivning av O3 åren 2054–2055 och gemensamma anläggningar 2050–2055. Nedmontering och rivning av de gemensamma anläggningarna planeras i två etapper.

Målsättningen är att avlägsna radioaktivt material och återställa anläggningen till en friklassad anläggning. En friklassad anläggning uppnås när det inte längre föreligger restriktioner från myndigheterna för användning av mark eller byggnader.

I figur 15-4 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Oskarshamns kärnkraftverk.

Avfallshantering

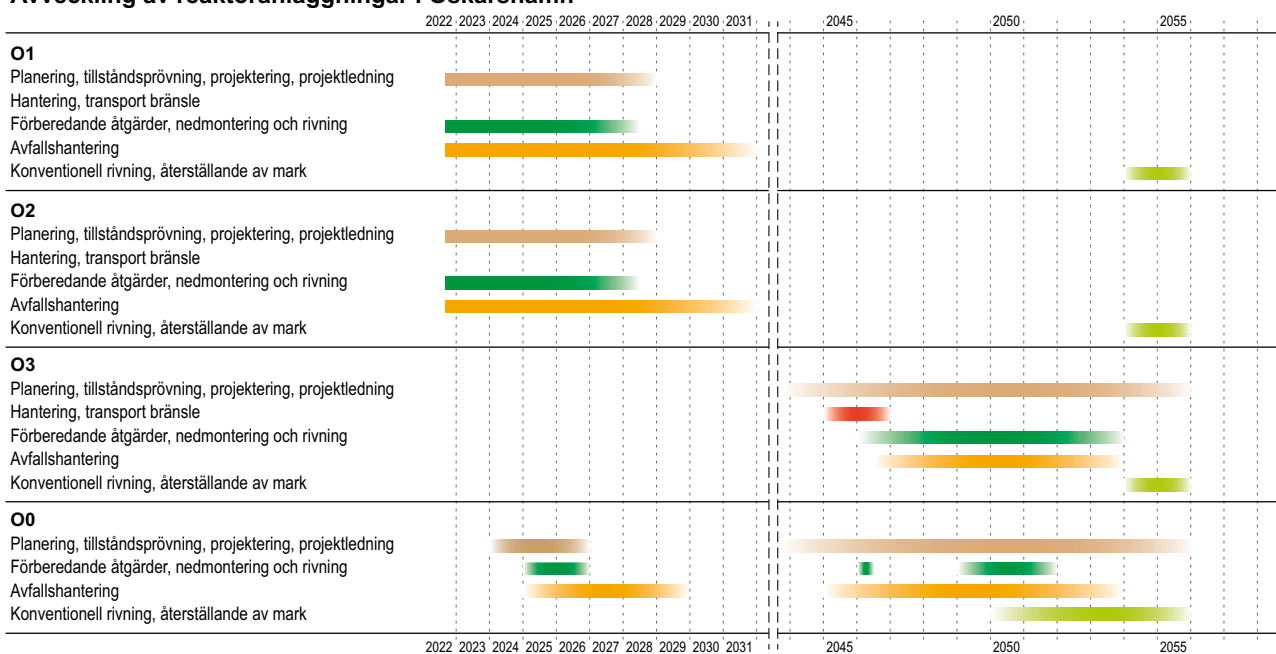
O1 och O2 befinner sig under nedmontering och rivning och samtliga erforderliga tillstånd för att starta nedmontering och rivning har erhållits för båda reaktorerna. Under genomförandet anmäls de olika arbetspaketen/delmomenten löpande enligt gällande tillståndsvillkor.

Den storskaliga nedmonteringen inleddes 2020 och dessförinnan hade förberedande åtgärder utförts i form av exempelvis tömning av bränsle samt segmentering av interna reaktordelar. En radiologisk kartläggning av anläggningarna har gjorts, liksom en 3D-skanning. Anläggningarnas byggnadsdelar och material har delats in i olika spår för material- och avfallshantering.



Figur 15-3. Vy över OKG Aktiebolags kärnkraftverk med de tre BWR-reaktorerna O1, O2 och O3 från vänster till höger i bild.

Avveckling av reaktoranläggningar i Oskarshamn



Figur 15-4. Principiell översikt av OKG Aktiebolags tidsplan för avveckling (O0 är gemensamma anläggningar som redovisas separat).

Material och avfall som uppkommer i samband med avvecklingen är av samma typ som det som uppkommer under drift, med skillnaden att volymerna är större under avvecklingen. Det innebär att material- och avfallshanteringen anpassas, men att beprövade tekniker och metoder kan användas. De större material- och avfallsmängderna under avvecklingen ställer krav på en väl fungerande material- och avfallslogistik. Avfallslogistiken byggs upp successivt baserat på flöde av material/avfall per tidsenhet, vilket kan erhållas genom att koppla ihop den tekniska rivningssekvensen med den radiologiska kartläggningen.

SFR och SFL är inte tillgängliga vid avvecklingen av O1 och O2. Material- och avfallshanteringen optimeras därför ur ett helhetsperspektiv, där möjliga och rimliga avbördningsvägar, såsom geologiska slutförvar, lokal friklassning, extern behandling och lokala markförvar, vägs mot varandra. Det innebär att redundans i avbördningsvägar eftersträvas där så är möjligt, och att en förordad avbördningsväg baseras på en samlad bedömning av faktorer, bland annat kostnad, risk, miljö och Alara-principer.

Vid avvecklingen av O1 och O2 (inklusive 0AVF) behöver det avfall som ska slutförvaras i det utbyggda SFR eller SFL mellanlagras på plats, tills slutförvaren är i drift. Det innebär, för det lågaktiva avfallet som ska transporteras till SFR, att det befintliga mellanlagret LLA (lagringsbyggnad för lågaktivt avfall) utökas. Däremot bedöms mellanlagring av medelaktivt avfall som ska transporteras till SFR och långlivat avfall som ska till SFL, rymmas i det befintliga mellanlagret BFA.

Det befintliga lokala markförvaret för slutförvaring av mycket lågaktivt avfall, behöver utökas för att kunna ta emot det mycket lågaktiva avfallet från avvecklingen av O1 och O2. En utökning krävs också för avfallet från den återstående driften av Oskarshamn 3 ska få plats. Markförvarets planerade utökning kommer också anpassas för avfall från avvecklingen av Barsebäck Kraft AB:s anläggningar.

Dimensioneringen av både mellanlager och markförvar styrs av behovet baserat på en optimal fördelning av de olika avbördningsvägarna utifrån angivna faktorer. Utökningarna hanteras i separata tillståndsprocesser.

Uppskattade avfallsmängder från avvecklingen baseras på mängderna från tidigare genomförda rivningsstudier och redovisas i respektive avvecklingsplan. För anläggningarna under nedmontering och rivning redovisas avfallsmängder även i gällande avfallsplan och mer specifikt i respektive delmomentsredovisning. För O1 och O2 finns mer ingående information om avfallsmängder per avfallstyp och aktivitetskategori, baserat på resultat från den radiologiska kartläggning av anläggningarna som genomförs och kommer att fortgå under avvecklingsprojekten.

Dekontaminering och friklassning av byggnader tillhörande O1 och O2 kommer att pågå parallellt med nedmontering och rivning. Friklassning av byggnaderna planeras vara genomförd 2028.

16 Planering för avveckling inom Vattenfall

I detta kapitel beskrivs Vattenfalls avvecklingsplanering på en övergripande nivå. Planerna gäller såväl Ågestareaktorn som reaktorerna i Forsmark och Ringhals.

Under avställningsdriften planeras förutom bränsletransporter, avställning av system och omhändertagande av driftavfall även förberedande aktiviteter inför nedmontering och rivning att genomföras. Förberedelserna, exempelvis dekontaminering av primärsystem, syftar till att göra efterföljande arbete så säkert och effektivt som möjligt. Detta åstadkoms bland annat genom att sänka dosraten vid arbete och vistelse i anläggningen och genom att öka möjligheterna till flexibilitet under nedmonteringen genom att flytta moment från tidskritisk linje (moment som påverkar slutdatum på projektet).

Avvecklingsprogrammets organisation kommer att ha som uppgift att planera och verkställa de olika ingående projekten, där kontrakterade entreprenörer används som huvudsaklig arbetskraft under genomförandefasen. Målet med detta är att hålla programorganisationen liten och effektiv.

För att få ett effektivt genomförande av avvecklingsprogrammen ska förutsättningar och omfattning vara väl definierade på förhand. Tiden för nedmontering och rivning ska optimeras med utgångspunkten att avvecklingen påbörjas utan dröjsmål efter avställning och med en sammanhållen genomförandefas. Detta innebär att tiden för servicedrift ska minimeras samt att nedmontering och rivning pågår tills anläggningens beslutade sluttillstånd uppnåtts.

Arbetet med nedmontering och rivning kommer att delas upp i ett lämpligt antal avgränsade paket/etapper. För att uppnå effektivitet planeras aktiviteterna i möjligaste mån att pågå parallellt i hela anläggningen. Planeringen av arbetsmomentens genomförande och inbördes kronologi kommer under hela avvecklingen att optimeras utifrån Alara och BAT för att minimera dos och maximera effektivitet.

Vattenfalls strategi för reaktortankarna från BWR-anläggningarna är att segmentera dem på plats i anläggningen. Segmenteringen av interndelarna sker med vattentäckning i hanteringsbassängen. Segmenteringen kan ske mekaniskt (exempelvis sågning, klippning, vattenskärning) alternativt termiskt (exempelvis plasmaskärning, laserskärning, gnistning). För R2, som är en PWR-reaktor, finns beslut om segmentering av både tank och interndelar. Halterna av långlivade radionuklider i interndelarna och tanken från R2 medför att avfallet behöver slutförvaras i SFL. I väntan på att SFL tas i drift måste avfallet mellanlagras lokalt i Ringhals och den hanteringen underlättas av att avfallet är segmenterat.

En avgörande skillnad mellan avveckling och drift av en anläggning är den betydligt större mängd avfall som uppstår under avvecklingen. Detta gör att kapaciteten för hantering av vissa avfallsströmmar måste öka väsentligt under avvecklingen för att inte hindra framdriften av arbetet. Kapacitetsökningen kan uppnås på flera olika sätt, till exempel genom att anpassa befintliga byggnader eller lokaler, inte behövs efter avställningen, för avfallshantering. Nya byggnader kan ändå behöva uppföras eller mobila lösningar införas på kärnkraftverket, för att klara av kapacitetsbehoven.

Generellt gäller att avfallshantering ska vara välgrundad och effektiv. Detta uppnås genom att klassificera avfallet redan innan det genereras och sortera det direkt vid uppkomst. Bearbetning av kärnavfall ska minimeras och i möjligaste mån genomföras i anslutning till dess uppkomst. Skapande av sekundäravfall ska så långt som möjligt undvikas. Stora komponenter ska kunna deponeras hela där detta är motiverat ur ett kostnads- och säkerhetsperspektiv. Tidskrävande avfallsbearbetning genomförs enbart om det sker med säkerställd nytta.

Avfallshantering, inklusive mellanlagring och slutförvaring, ska optimeras ur ett sammanhållet drift- och avvecklingsperspektiv på koncernnivå. Utgångspunkten är att utöka kapacitet för omhändertagande av avfallet där det bäst lämpar sig ur ett helhetsperspektiv, till exempel markförvar för mycket lågaktivt avfall.

Avvecklingsprogrammets framdrift ska till rimlig nivå göras oberoende av kapaciteter för avfallsbehandling, avfallstransport och färdiga slutförvar. För transport ska SKB:s transportsystem primärt nyttjas, men programmen är inte exklusivt bundna till detta. Koordinering av framför allt bränsletransporter ska ske på koncernnivå med målet att minimera påverkan på avvecklingsprogrammen.

Uppskattningsvis utgör den konventionella avfallsströmmen cirka 95 procent av den totala avfallsmängden, där majoriteten utgörs av rivningsmassor från byggnader. För att minimera kraven på efterhantering dekontamineras byggnader inför rivning. För de rivningsmassor som uppstår till följd av systemdemontering, etableras ett friklassningsförfarande i linje med befintlig friklassningshandbok (Berglund et al. 2016).

Sluttillståndet för avvecklingen är friklassad industritomt. Sluttillstånd för respektive avvecklingsprogram kan dock vara friklassningsbar industritomt där byggnader och infrastruktur som är av nytta för fortsatt verksamhet, och som är möjliga att friklassa utan att de rivs, lämnas medan övriga installationer rivs. Den konventionella rivningen av byggnader sker till cirka en meter under mark och kvarvarande hålrum återfylls med rivningsmassor. Det översta marklagret återställs till den status som den fortsatta industriella verksamheten på platsen kräver.

16.1 Ringhals AB:s planering för avveckling

Ringhals kärnkraftverk är beläget på Väröhalvön inom Varbergs kommun i Hallands län. Verket har fyra reaktorer varav Ringhals 1 (R1) är av reaktortypen BWR och Ringhals 2 (R2), Ringhals 3 (R3) och Ringhals 4 (R4) är av reaktortypen PWR. Området upptar totalt 2,5 kvadratkilometer och inrymmer, förutom R1–R4, gemensamma byggnader och faciliteter för avfallshantering, kontor, verkstäder, förråd, tillfartsvägar med mera, se figur 16-1.

R1 och R2 byggdes under 1970-talet och placerades inom ett gemensamt driftområde. Under 1980-talet byggdes R3 och R4, vilka förlades till ett driftområde som ursprungligen var skilt från R1 och R2. Driftområdena länkades senare ihop via en transportväg. Reaktorerna placering ger goda förutsättningar för att åter separera reaktorparen och möjliggöra parallell drift och avveckling inom olika driftområden efter slutlig avställning av R1 och R2.



Figur 16-1. Ringhals kärnkraftverk med reaktor R1 och R2 ovanför reaktor R3 och R4 i figuren. I centrum av förläggningsplatsen finns bland annat kontorslokaler och lunchrestaurang. Strax till vänster om R1 i figuren syns verkets avfallsområde vilket inkluderar hantering, konditionering och lagring av kärnavfall.

Från början planerades för ytterligare ett antal reaktorer, vilket gör att området är stort. Det möjliggör en effektiv logistik, eftersom det finns utrymme för exempelvis tillfällig lagring av avfall och möjlighet till olika transportvägar inom området. Avvecklingen av R1 och R2 underlättas även rent avfallslogistiskt av att den befintliga avfallsanläggningen är placerad intill R1.

I omedelbar närhet av förlägningsplatsen ligger Videbergs hamn, som används för utskeppning av bland annat bränsle och avfall.

Övergripande planering

Avvecklingen av reaktorerna i Ringhals återges i två avvecklingsplaner, en för R1 och R2 och en för R3 och R4. Planerna bygger på den övergripande strategi och de mål som presenteras i inledningen av kapitlet. Drift av reaktorerna R1 och R2 pågick till slutet av 2020 respektive slutet av 2019. Avstängningen grundar sig på beslut som fattades under 2015 att båda reaktorerna skulle tas ur drift tidigare än ursprungligen planerat. För reaktorerna R3 och R4 kvarstår planeringsförutsättningarna om drift till 2041 respektive 2043. Avställningsdriften för R1 pågick under 16 månader och 28 månader för R2, då kylbehov och kapacitet för bränsletransport beaktats. I juni 2022 övergick både R1 och R2 i servicedrift. Planerat inträde i nedmontering och rivning är efter sommaren 2023.

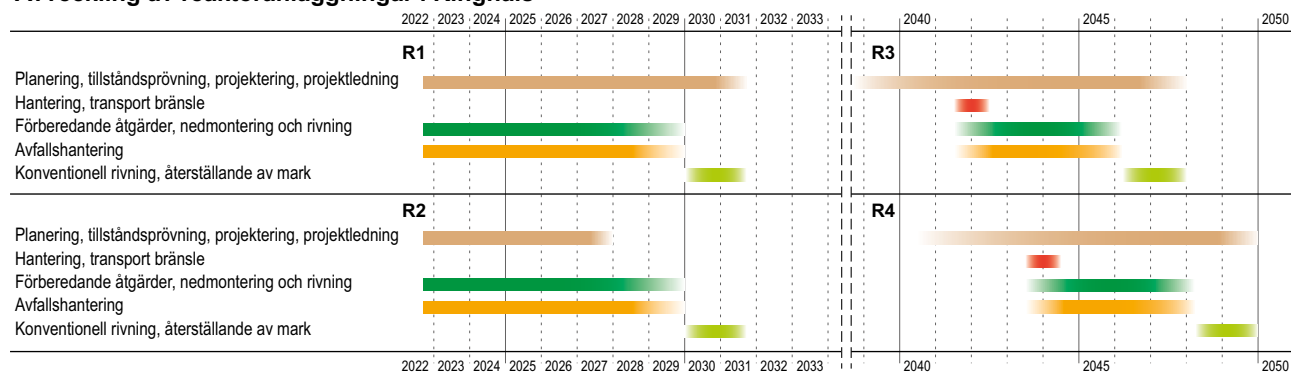
I december 2015 inleddes arbetet med att planera nedmontering och rivning av R1 och R2, idag samlat i ett program. Fokus hittills har varit att analysera de tekniska, legala, tidsmässiga samt affärs- mässiga förutsättningarna för avvecklingen samt att i detalj utvärdera hur de specifika momenten under avvecklingen ska lösas på bästa sätt. Detta inkluderar analys av bland annat rivningsmetodik, organisation och avfallshantering. I avvecklingsplanen beskrivs de aktiviteter som analyseras eller genomförs under de olika programfaserna.

Ringhals AB erhöll 2020 ändringstillstånd enligt MB för reaktorerna R1 och R2 att tillåtas övergå från avställningsdrift och servicedrift till fullständig nedmontering och rivning. I samband med avställningsbeslutet startades projekt Sture – Säker och Trygg Utfasning av R1 och R2, med uppgiften att identifiera, analysera och genomföra åtgärder som krävs för att R3 och R4 ska kunna drivas vidare när R1 och R2 avvecklas samt att hålla ihop portföljen med förberedande åtgärder inför nedmontering och rivning. Projekt Sture slutförs under 2022 och övergår i Ringhals avdelning för avveckling då den förberedande fasen avslutats. Projektet ska bland annat se till att reaktorparet som ska drivas vidare fysiskt separeras från det som ska avvecklas (Projekt Split), ombesörja bränslebortförsl från de sista härdarna samt dränera system och forsla bort driftavfall och även se till att de förberedande aktiviteter som behövs inför nedmontering och rivning genomförs. Systemdekontaminering, med syftet att minska dosraten i anläggningen, är genomförd.

Nytt gemensamt program har skapats som inbegriper alla avvecklingsaktiviteter, såväl de förberedande aktiviteterna, som tidigare låg under projekt Sture, som aktiviteterna för genomförande av avvecklingen, som tidigare låg inom R12D-programmet.

I figur 16-2 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Ringhals kärnkraftverk.

Avveckling av reaktoranläggningar i Ringhals



Figur 16-2. Principiell översikt av Ringhals AB:s tidsplan för avveckling.

Avfallshantering

Eftersom slutlig avställning av R1 och R2 inträffat vid en tidpunkt då utbyggda SFR ännu inte har tagits i drift, krävs mellanlagring av det radioaktiva avfallet som uppstår. Detta kan ske lokalt på Ringhals kärnkraftverk och/eller externt. Genom mellanlagring på kärnkraftverket minimeras de externa beroendena kopplat till avfallshanteringen, vilket gör att detta alternativ är förstahandsvalet för de flesta avfallsströmmar. Mellanlagring på kärnkraftverket ska ske i ombyggda befintliga lager för medelaktivt avfall samt, från år 2023, i ett nytt lager för lågaktivt avfall på det befintliga avfallsområdet.

Reaktortanksegment från R1 kan tack vare det relativt ringa aktivitetsinnehållet deponeras i SFR. De mest neutronaktiverade interndelarna segmenteras och paketeras för mellanlagring inför kommande deponering i SFL. Interndelar som befunnit sig en bit från härdregionen såsom fuktavskiljare och ångseparator, planeras att segmenteras och deponeras i SFR.

Reaktortankarna och interndelarna hos R2, R3 och R4 behöver till följd av sin kraftigare aktivering deponeras i SFL. För R2 finns ett inriktningsbeslut om att segmentera tank och interndelar, för R3 och R4 är sluthanteringen ännu inte beslutad. Mellanlagring sker i Ringhals till dess att SFR är utbyggt respektive SFL tagits i drift.

Uppskattade avfallsmängder från avvecklingen har redovisats i avvecklingsplan, avfallsplan och kommer att redovisas mer detaljerat i respektive delmomentsredovisning. Redovisade avfallsmängder per avfallstyp och aktivitetskategori kommer att baseras på resultat från den radiologiska kartläggningen som uppdateras löpande under rivningen.

16.2 Forsmarks Kraftgrupp AB:s planering för avveckling

Forsmarks kraftstation är belägen på ostkusten, cirka fyra kilometer norr om Forsmarks bruk, inom Östhammars kommun i Uppsala län. Inom anläggningen finns tre kärnkraftsreaktorer, Forsmark 1 (F1), Forsmark 2 (F2) och Forsmark 3 (F3), se figur 16-3. Till kraftverket hör även byggnader för tillfälligt boende, förråd, verkstäder och administration. Det finns även en hamn, som bland annat används av fartyg för transport av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall till SKB:s anläggningar.



Figur 16-3. Forsmarks kraftstation med de tre BWR-reaktorerna F1, F2 och F3 från vänster till höger i bild.

F1 och F2 är sammanbyggda anläggningar, medan F3 ligger fristående placerat nordväst om dessa. Gemensamma anläggningar såsom tillfartsväg, hamn, vatten- och avloppsreningsverk, vattentorn och administrationsbyggnader utnyttjas av samtliga tre reaktorer samt av SFR. Områdets utrymme ger goda förutsättningar för parallell drift och avveckling. Stora ytor finns även tillgängliga för tillfälliga uppställningsplatser och för etablering av olika transportalternativ.

Övergripande planering

Forsmarks Kraftgrupp AB:s nuvarande planer är 60 års drift för alla tre reaktorerna, vilket innebär slutlig avställning för F1 år 2040, F2 år 2041 och F3 år 2045. Vid slutlig avställning inleds en tid med avställningsdrift vars längd i största mån ska minimeras. I dagsläget bedöms vara cirka 12 månader.

Avvecklingen av F1, F2 och F3 återges i avvecklingsplanen och bygger på den övergripande strategi och de mål som presenteras inledningsvis i kapitlet. F1 och F2 förväntas nedmonteras och rivras på ett sätt som maximerar synergivinster och minimerar behovet av anläggningsseparation alternativt servicedrift. I slutet av avvecklingsprojekten för F1 och F2 etableras avställningsdrift på F3, vilket gör att avveckling förväntas pågå på området utan uppehåll från starten av det första projektet till dess att den sista reaktorn slutligt nedmonterats. I figur 16-4 presenteras den övergripande tidsplanen för avvecklingen av Forsmarks kärnkraftverk.

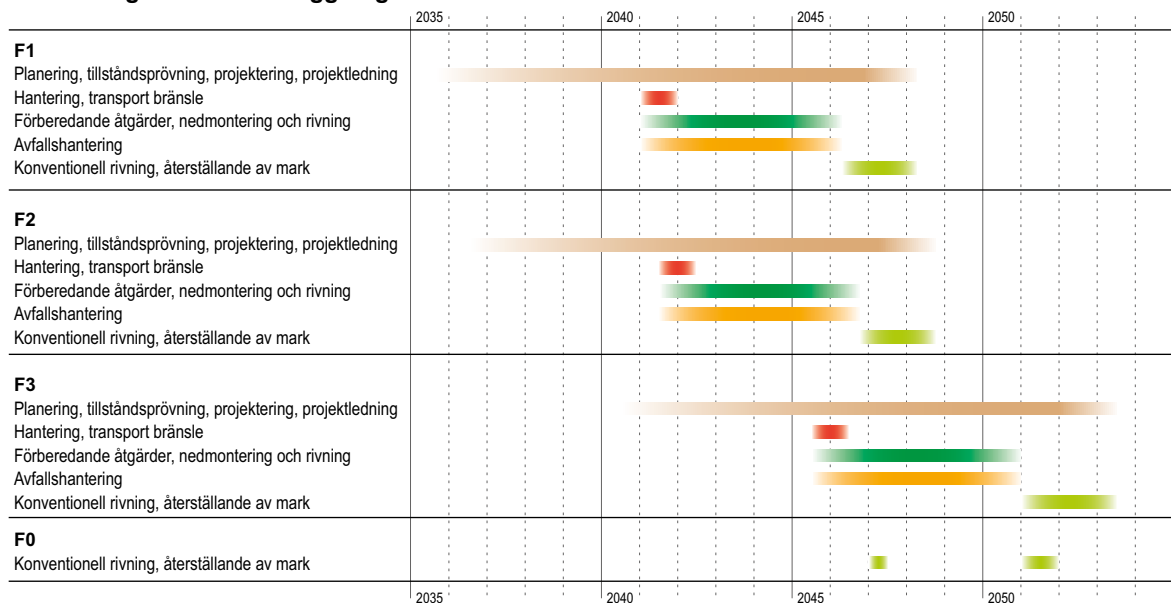
Grundplaneringen utgår från att SFR är i drift vid tidpunkten för nedmontering och rivning av Forsmarks anläggningar, vilket innebär att behovet av mellanlagring kan begränsas till det långlivade avfallet som ska deponeras i SFL. Det kortlivade låg- och medelaktiva avfallet skickas direkt efter emballering till SFR.

Avfallshantering

När nedmontering och rivning startar 2040 förväntas SFR vara utbyggt och i drift. SFL kommer inte vara klart för mottagning av avfall, vilket innebär att mellanlagring av långlivat avfall kommer att ske men slutkonditionering kommer att ske senare.

Avställningen kommer att resultera i ett antal avfallsströmmar. Bränsle kommer att transporteras till Clink och sedan vidare till Kärnbränsleförvaret, medan övrigt avfall kommer att sorteras upp i kortlivat avfall och långlivat avfall (till SFL). Det kortlivade avfallet, som inte kan friklassas, sorteras med avseende på aktivitetsinnehåll och deponeras i markförvar eller i SFR.

Avveckling av reaktorläggningar i Forsmark



Figur 16-4. Principiell översikt av Forsmarks Kraftgrupp AB:s tidsplan för avveckling. F0 utgörs av gemensamma anläggningar.

Reaktortankarna från F1–F3 med sina interndelar kommer att segmenteras, vissa interndelar såsom fuktavskiljare, ångseparator och reaktortank planeras att deponeras i SFR och andra såsom härdgaller, härdinstrumentering, delar av moderatortank, moderatortanklock och bränsleuppställningsplatta planeras att deponeras i SFL.

Uppskattade avfallsmängder från avvecklingen har redovisats i avvecklingsplan, avfallsplan och kommer att redovisas mer detaljerat i respektive delmomentsredovisning. Redovisade avfallsmängder per avfallstyp och aktivitetskategori kommer att baseras på resultat från den radiologiska kartläggningen som uppdateras löpande under rivningen.

16.3 Vattenfalls planering för avveckling av Ågestareaktorn

Ågestaanläggningen, som är lokaliserad cirka 20 kilometer söder om Stockholm, i Huddinge kommun, Stockholms län, var den första kommersiellt elproducerande kärnkraftsanläggningen i Sverige. Ågestareaktorn var en tungvattenmodererad PWR-reaktor på 80 MW som dels försörjde Farsta med fjärrvärme, dels elnätet med 10–12 MW el.

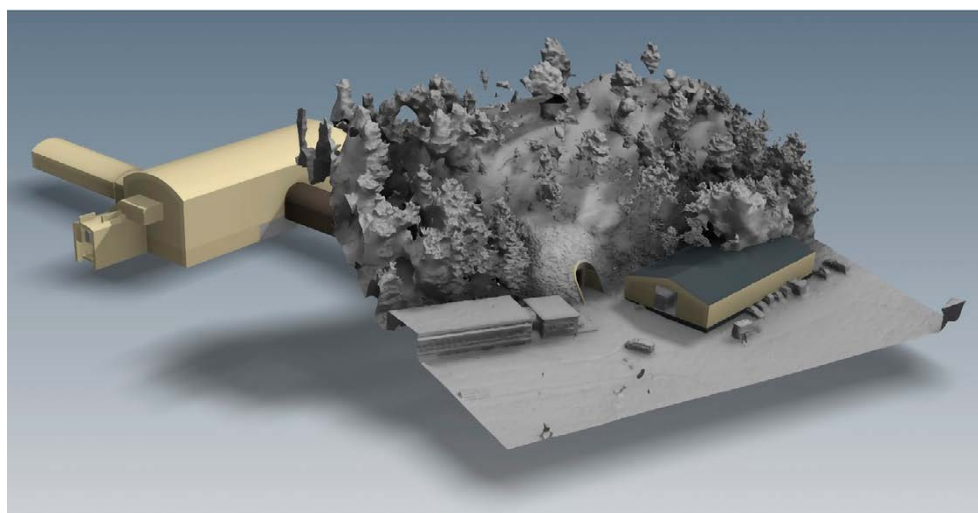
Själva reaktorn, och ett flertal andra viktiga anläggningsdelar, är förlagda i ett bergtrum, se figur 16-5. Bergtrummet fungerade tillsammans med ett plåtskal som inneslutning. Reaktortanken och de två återstående ånggeneratorerna är belägna inuti inneslutningen. Inne i bergtrummet, men utanför plåtskalet, ligger kontrollrummet, kontroll- och ställverksbyggnad samt transporttunnel och reservutgång.

Till följd av att Ågestaanläggningen är inrymd i ett bergtrum, är utrymme och möjligheter begränsade för att hantera och mellanlagra avfall på plats. Ågestas lokalisering gör att alla transporter måste ske på väg. Placeringen nära tätbebyggt område gör dessutom att de biltransporter som måste genomföras, kommer att påverka närboende och närliggande anläggningar i viss grad.

Övergripande planering

Avvecklingen av Ågestaanläggningen genomförs i programform som består av ett flertal projekt och uppdrag. Programmet styrs av BUND.

Vattenfalls slutmål är att avlägsna radioaktivt material så att anläggningen, det vill säga bergtrummet, turbinhallen, ovanmarks- och undermarksanläggningar kan friklassas och det kärntekniska tillståndet upphävas.



Figur 16-5. 3D-vy över Ågestareaktorn som är inrymd i ett bergtrum.

I juli 2019 erhöll Vattenfall tillstånd för att påbörja nedmontering och rivning av Ågestaanläggningen enligt MB, KTL och SSL. För att uppfylla krav på genomförande av en säker avveckling har anläggningen uppgraderats i vissa delar. Avvecklingsarbetet påbörjades i juni 2020. Figur 16-6 återger tidsplanen för den återstående delen av avvecklingen av Ågestareaktorn.

Arbetet delas upp i två större delmoment, segmentering av reaktortank på plats samt nedmontering av övriga kontaminerade system, komponenter och strukturer. Arbetsinsatserna inom de två delmomenten sker till viss del parallellt och baseras på en gemensam planering av bland annat logistik, bemanning och stråldoser. Det parallella genomförandet gör att kompetens och resurser tas tillvara på ett rationellt sätt, då den personal som finns tillgänglig i anläggningen har möjlighet att bidra till flera olika arbeten. Därigenom blir det en effektiv framdrift och lärdomar sprids mellan de olika projekten. I delmomenten ingår borttagning av isolering och sanering av annat miljöfarligt avfall, packning av avfall i standard-avfallsbehållare samt avsökning och transport till AB SVAFO för mellanlagring alternativt för vidare hantering hos extern part.

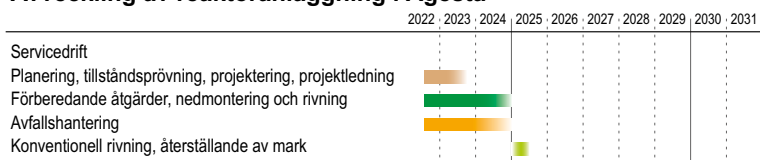
Efter avslut av projekt Bulk (nedmontering av övriga kontaminerade system, komponenter och strukturer) bedöms bergrummet vara i ett skick som uppfyller krav för friklassning. Ansökan om friklassning planeras lämnas in till SSM under 2024 med målsättning att erhålla ett beslut runt årsskiftet 2024/2025. Efter att beslut har erhållits om friklassning, kommer alla schaktutrymmen att förslutas med betongpluggar och alla ledningar kommer att kapas och tätas. Därefter kommer anläggningen att överlämnas till Stockholm stad, som är fastighetsägare.

Avfallshantering

De olika avfallsströmmar som genereras i samband med Ågestareaktorns nedmontering och rivning omhändertas enligt förutbestämda hanteringssteg. Hanteringen är skräddarsydd för att antingen leda fram till friklassning av materialet eller till att skapa avfallskollin som lämpar sig för deponering i något av slutförvaren inom SKB:s slutförvarssystem.

Inför avvecklingen iordningsställdes en mindre avfallslogistikyta i anslutning till bergsanläggningen. Den ytan kan användas för tillfällig uppställning av färdiga kollin med låga dosrater i väntan på transport från anläggningen. På så vis säkerställs att arbete inne i bergsanläggningen kan fortsätta utan risk för att logistiska flaskhalsar uppstår inne i den trånga anläggningen. Avfall transporteras från bergrummet till mellanlager i Studsvik i väntan på driftsättning av SFL och utbyggt SFR.

Avveckling av reaktorläggning i Ågesta



Figur 16-6. Principiell översikt av tidsplanen för den planerade avvecklingen av Ågestareaktorn.

17 Planering för avveckling av SKB:s anläggningar

SKB:s anläggningar är bland de sista kärntekniska anläggningarna att avveckla i Sverige och avvecklingen ligger cirka 50 år fram i tiden. Avvecklingsplaneringen kan därför bara beskrivas övergripande och med hänvisningar till befintliga avvecklingsplaner för mer detaljerad information.

17.1 Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle – Clink

SKB är tillståndshavare för Clab nu och kommer även att vara det när integreringen av den planerade inkapslingsdelen är klar och anläggningen övergått till att kallas Clink. Avvecklingsplanen för Clink uppdaterades under 2014 i samband med hanteringen av kompletteringar gällande tillståndsansökan för Clink. En uppdatering kommer att ske igen i samband med framtagandet av PSAR inför uppförandet av inkapslingsdelen. Avvecklingen av Clink kommer att inledas efter att allt använt kärnbränsle kapslats in och deponerats i Kärnbränsleförvaret. Tidsplanen är beroende av när den sista kärnkraftsreaktorn tas ur drift, men när avvecklingen har påbörjats planeras den vara avslutad inom fem till sju år.

Målet med avvecklingen är att avlägsna radioaktivt material och friklassa anläggningen. Detta innebär att byggnader, inklusive all utrustning och mark ska friklassas utifrån den efterföljande verksamhet på platsen.

SKB tog under 2013 fram en studie för avveckling av Clink i syfte att ge underlag till utbyggnaden av SFR gällande avfallsinventarium samt som kostnadsuppskattning för planarbetet (Edelborg et al. 2014). Det radioaktiva avfallet från nedmontering och rivning ska enligt gällande planer skickas till SFR för slutförvaring.

För den befintliga anläggningen Clab finns en avvecklingsplan framtagen, vilken i nuläget är den som är gällande. Den uppdaterades under 2020 med tydliggörande av hur nedmontering och rivning planeras för de delar av anläggningen som är belägna under mark.

Efter att SKB erhållit en godkänd PSAR för Clink samt att en uppdaterad avvecklingsplan för anläggningen anmälts till SSM enligt 9 kap. 1 § SSMFS 2008:1 kan avvecklingsplanen för Clink ersätta befintlig avvecklingsplan för Clab.

17.2 Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall – SFR

SKB är tillståndshavare för SFR och avvecklingsplanen för befintlig anläggning uppdaterades under 2018 i samband med att SKB till SSM redovisade den återkommande helhetsbedömningen av anläggningens säkerhet och strålskydd.

Under Fud-perioden har en uppdatering av avvecklingsplanen för ett utbyggt SFR tagits fram. Uppdateringen har genomförts parallellt med framtagande av PSAR för anläggningen.

Avvecklingen av SFR påbörjas när den huvudsakliga verksamheten upphör med syfte att inte återupptas. Avvecklingen fortsätter, till dess att anläggningen ovan mark är friklassad och radiologiska skäl inte förhindrar etablering av annan industriell verksamhet på platsen. Avfallet från de anläggningsdelar som kan bli föremål för rivning i samband med avveckling (ovanmarksdelarna), betraktas som konventionellt då de inte innehåller något radioaktivt material. En radiologisk kartläggning av anläggningen kommer att behöva göras för att utesluta eventuell kontaminering av byggnadsdelar som varit i kontakt med avfallsbehållare under drift, exempelvis terminalbyggnaden. Målet med avvecklingen är att uppnå en friklassad anläggning. Hur långt rivningen ska bedrivas beror därefter främst på den fortsatta användningen av anläggningsområdet.

Tidsplanen för när SFR ska avvecklas är kopplad till när de sista, nu befintliga, kärnkraftverken och SKB:s övriga kärntekniska anläggningar är nedmonterade och det radioaktiva avfallet har deponerats. Då kan avvecklingen av SFR inledas och planeras att avslutas inom fem år.

Efter att SKB erhållit en godkänd PSAR för ett utbyggt SFR samt att en uppdaterad avvecklingsplan för anläggningen anmälts till SSM – enligt 9 kap. 1 § SSMFS 2008:1, kan avvecklingsplanen för det utbyggda SFR ersätta avvecklingsplanen för befintligt SFR.

17.3 Slutförvaret för långlivat avfall – SFL

Ingen avvecklingsplan finns ännu framtagen för SFL, då utformningen av detta slutförvar befinner sig på konceptstadiet. En avvecklingsplan planeras att tas fram i samband med F-PSAR för anläggningen. Avvecklingen kommer att inledas i samband med förslutning av förvaret, vilket kan ske först när det långlivade avfallet från kärnkraftverken och från övriga kärntekniska anläggningar har omhändertagits och deponerats.

17.4 Kärnbränsleförvaret

Gällande avvecklingsplan för Kärnbränsleförvaret utarbetades under 2017. Det var en uppdatering som genomfördes för att harmonisera med gällande föreskrifter samt för att följa den branschgemensamma strukturen för en avvecklingsplan.

Avvecklingen av Kärnbränsleförvaret vidtar efter att den huvudsakliga driften avslutats, det vill säga när allt använt kärnbränsle deponerats, deponeringstunnlarna återfyllts och pluggar installerats. Avvecklingen innebär förslutning av återstående delar av undermarksdelen och rivning av ovanmarksdelen. Förslutningen av undermarksdelarna är en del av förvarets barriärfunktioner och av betydelse för säkerheten efter förslutning.

När avvecklingen startar kommer det inte att finnas någon kontamination i anläggningen ovan mark. Rivningen utförs därför som för en konventionell anläggning och avfallet sorteras och återvinns i möjligaste mån, eller läggs på deponi. Farligt avfall hanteras enligt gällande bestämmelser. Därefter genomförs en markundersökning som ligger till grund för efterbehandling av området.

18 Fortsatta aktiviteter inom avveckling

I detta kapitel ges en översikt av det genomförda och planerade utvecklingsarbetet som rör avveckling av kärntekniska anläggningar. I avsnitt 18.1 presenteras en överblick av industrigemensamma utvecklingsarbeten. I avsnitt 18.2 och 18.3 presenteras utvecklingsarbeten inom Uniper respektive Vattenfall.

18.1 Industrigemensamt utvecklingsarbete

Det industrigemensamma utvecklingsarbetet rörande avveckling av kärntekniska anläggningar bedrivs i stor utsträckning av SKB gemensamt med kärnkraftsföretagen. Merparten av det utvecklingsarbete som sker inom SKB är inte enbart kopplat till avveckling, utan till avfallshantering generellt. Presentation av genomförda och planerade utvecklingsaktiviteter finns därför redovisade i del II och omfattar bland annat områdena

- referensinventarium,
- avfallsbehållare, avfallstransportbehållare,
- acceptanskriterier för avfall i SFL och det utbyggda SFR.

Nedan ges exempel på aktiviteter som genomförts och arbete som planeras under Fud-perioden med bäring på avveckling.

18.1.1 Icke-reguljära bränslen

En förutsättning för att kunna påbörja nedmontering och rivning är att anläggningen är fri från använt kärnbränsle, inklusive skadat bränsle som kan finnas i anläggningen. Under 2015 initierades ett projekt med målsättningen att utveckla en metod för att omhänderta skadat bränsle i Forsmark, Ringhals och Oskarshamn. Metoden går ut på att kapsla in det skadade bränslet i specialutformade behållare. Det finns två typer av behållare för inkapsling av skadat bränsle, vilka benämns transportboxar respektive Quivers. Fyllda behållare kan transporteras till Clab för mellanlagring. I Clink kommer de att placeras i kopparkapslar, förslutas och transporteras till och deponeras i Kärnbränsleförvaret. Projektet har under den gångna Fud-perioden slutförts och allt skadat bränsle har omhändertagits.

Med introduktionen av Quivers har SKB etablerat en praktisk, säker och långsiktigt kostnadseffektiv metod för att omhänderta skadade bränslestavar i kärnkraftverken.

18.1.2 Harmoniserad tillståndsprocess

En grundläggande förutsättning för att kunna genomföra de planerade avvecklingsprojekten är att kravställda tillstånd erhålls. Flera avvecklingsprojekt genomförs och planeras att genomföras parallellt och det skulle vara effektivt och öka möjligheterna att nå satta milstolpar enligt framtagna tidsplaner om samtliga tillståndshavare och med berörda instanser har en enhetlig process.

Sedan ett antal år pågår en översyn av hela SSM:s författningssamling. Efter översynen kommer författningssamlingen att vara strukturerad i tre nivåer under gällande kärnteknik- och strålskyddslag. Under den gångna Fud-perioden har ett branschgemensamt remissarbete genomförts via KSKG av de framtagna föreskrifterna som rör konstruktion, analys och drift av kärnkraftreaktorer respektive kärnämne och kärnavfall. För de sistnämnda finns nu ett gemensamt tolkningsdokument.

En gemensam tolkning av föreskrifter är ett led i att skapa enhetliga processer inom kärnkraftsindustrin och det gemensamma remissförfarandet kommer att fortsätta under hela översynen av SSM:s författningssamling som är planerad att genomföras under de kommande åren.

18.1.3 Internationellt utvecklingsarbete

Under den gångna Fud-perioden har SKB och reaktorinnehavarna bevakat och deltagit i det internationella utvecklingsarbetet som pågår inom avveckling och teknik för nedmontering och rivning.

Det huvudsakliga utbytet sker inom OECD/NEA:s samarbetsprogram, men även IAEA:s program är av vikt. Det sistnämnda fokuserar i högre grad på utvecklingen av IAEA:s Safety Standards som ligger till grund för medlemsländernas kravbild.

Inom OECD/NEA sker deltagande via CDLM. Under 2019 och 2020 har CDLM utvecklats med bland annat nya arbetsgrupper och expertgrupper som ska driva arbetet inom flera områden som är av relevans för avvecklingsprojekt, inklusive kostnader, organisation, säkerhet och miljöaspekter.

Utbyte av erfarenheter och kunskap gällande avveckling av kärntekniska anläggningar har under en längre tid pågått mellan den svenska kärnkraftsindustrin och spanska Enresa. Samarbetet hade dock uppehåll under 2020–2021, på grund av de reserestriktioner som covid-19-pandemin föranledde.

Program

SKB och reaktorinnehavarna kommer även fortsättningsvis att delta i de internationella nätverken inom avveckling, vilka ger såväl nytta som möjlighet att bidra med erfarenheter. Det kommer att finnas behov av utbyte av mer ingående kunskaper och erfarenheter vartefter de planerade avvecklingsprojekten i Sverige startar. Mer erfarenhet byggs då upp inom landet och behovet att inhämta information ökar.

Samarbetet och kunskapsutbytet mellan spanska Enresa och den svenska kärnkraftsindustrin planeras att återupptas och fortgå under Fud-perioden.

Reaktorinnehavarna driver även egna bilaterala samarbeten och erfarenhetsutbyten internationellt och är också engagerade i olika konferenser och workshops.

18.2 Utveckling inom Uniper

Project Performance Center (PPC) etablerades 2017 för att koordinera Unipers avvecklingsprogram. PPC fokuserade på olika scenarier för avveckling med avseende på tidpunkt för genomförandet och hur dessa scenarier förhåller sig till teknisk sekvens, organisation, avfallshantering och finansiering.

Under slutet av 2018 fattades ett strategiskt beslut om att genomföra avvecklingsprogrammet för B1/B2 och O1/O2. Programmet följer kritisk linje som ligger sekventiellt mellan anläggningarna.

Under 2020 och 2021 etablerade Uniper och Fortum ett konsortium (Fortum-Uniper Nuclear Service) som under 2021 kontrakterades för det tekniska genomförandet av rivning och avveckling hos OKG Aktiebolag och Barsebäck Kraft AB. Konsortiet bygger vidare på de erfarenheter man fick under perioden då PPC verkat.

Utöver att slutföra det interna avvecklingsprogrammet avser konsortiet att erbjuda tjänster utanför den egna koncernen. Uniper bedömer att marknaden under lång tid framöver kommer att efterfråga dessa tjänster som dessutom skapar en attraktiv möjlighet för fortsatt sysselsättning för de medarbetare som är engagerade i avvecklingsarbetet.

Program

Den storskaliga nedmonteringen pågår på samtliga anläggningar. Avvecklingsprogrammet bygger på samordning av Barsebäck Kraft AB och OKG Aktiebolag för att nå synergieffekter och för att bidra till en säker och effektiv avveckling. Under inledningen av avvecklingen har utvecklingsbehovet varit i princip detsamma för både Barsebäck Kraft AB och OKG Aktiebolag. Fokus har legat på att utveckla processer. Framöver utgörs de huvudsakliga aktiviteterna av:

- Förädling av strategin med beaktande av samverkan med det kontrakterade konsortiet.
- Projektering, detaljprojektering och genomförande av kvarvarande arbetspaket, allteftersom man kommer vidare i den tekniska sekvensen.

- Förädling av olika funktionella delprocesser – material- och avfallshantering, nedmontering och rivning, drift och underhåll samt skydd och säkerhet. Exempelvis utveckling och optimering av anläggningarna, markförvar, mellanlager, friklassning och logistik.
- Insamling av erfarenheter för att uppnå läroeffekter inom den tekniska sekvensen samt avseende långsiktig erfarenhetsåterföring till avvecklingen av O3 och O0.

18.3 Utveckling inom Vattenfall

Sedan Fud-program 2019 har ett beslut fattats om att inte flytta de kärntekniska tillstånden för R1 och R2 till Vattenfall AB. Den ändrade inriktningen innebär att Ringhals AB förblir tillståndshavare för dessa anläggningar även under avvecklingen. Vattenfalls övergripande beslut om att samla koncernens avvecklingskompetens i ett separat affärsområde, BUND ligger dock fast. Avvecklingen av R1 och R2 kommer att genomföras i ett gemensamt avvecklingsprogram med gemensam styrning av Ringhals AB och BUND. Programmet ska koordinera och säkerställa att avvecklingen genomförs på ett säkert och kostnadseffektivt sätt.

Vattenfall arbetar ständigt med erfarenhetsåterföring från avvecklingen på ett strukturerat sätt. Avvecklingskompetens och erfarenheter som erhållits inom koncernen vid avvecklingen av R2-reaktorn i Studsvik ska samordnas och överföras till avvecklingen av Ågesta, R1 och R2. Likaledes pågår insatser för att utbyta erfarenheter och utnyttja samordningsfördelar mellan Vattenfalls avvecklingsverksamheter i Tyskland och de i Sverige, både för anläggningar som är slutligt avställda och för kommande avvecklingsprojekt.

Ågestaprogrammet har sedan Fud-program 2019 gått in i fasen nedmontering och rivning. I anläggningen bedrivs idag operativ verksamhet för att nedmontera system och avlägsna den kontamination som överstiger friklassningsgränsvärdena. Stora komplexa komponenter såsom laddmaskin, avblåsningssystem och tungvattentankar har nedmonterats och omhändertagits. Avvecklingsprogrammet, som planeras att vara avslutat under senare delen av år 2025, har påverkats av covid-19-pandemin som bland annat begränsat arbetet i det trånga bergrummet och tillgången till containrar.

Program

Liksom under den gångna Fud-perioden kommer en stor del av det utvecklingsarbete som bedrivs framöver, att genomföras som en integrerad del av avvecklingsprogrammen. Det förbättringsarbete som pågår eller planeras för perioden inkluderar:

- Förbättringar av effektivitet i samband med friklassning (av system, byggnader och mark), inklusive dekontaminering och mätsystem. Såväl förfinade statistiska metoder som robotteknik och artificiell intelligens (AI) undersöks.
- Ett aktivt arbete med ständiga förbättringar för redan etablerade avfallsprocesser, inklusive optimering av bearbetnings-, dekontaminerings- och avfallskonditioneringsinsatser.
- Fortsatt volyminimering med koppling till slutförvarssäkerhet och systemutnyttjande (mycket lågaktivt, kortlivat och långlivat avfall).
- Utarbeta tekniska lösningar för robotisering/automatisering av avancerade rivningsmoment med målsättning att minska dosbelastning till personal.
- Utveckla en förbättrad styrningsmodell tillsammans med leverantörsmarknaden för att öka fokus på industriell säkerhet och arbetsmiljö.
- Utveckla kostnadsmodellen för att beräkna och värdera kostnader för avveckling av kärnteknisk anläggning så att risker och osäkerheter tydliggörs samt möjliggöra att känslighetsanalyser utförs kring kostnadsdrivande parametrar.
- Vidareutveckla och anpassa portfölj-, program- och projektprocessen. Detta syftar bland annat till att säkerställa att avvecklingsaktiviteterna optimeras såväl vad gäller tid och genomförande samt att det faktiska arbetet genomförs säkert och effektivt.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer. SKBdoc-dokument lämnas ut vid förfrågan till dokument@skb.se.

Abarca E, Sampietro D, Roman-Ross G, Molinero J, Lidman F, Kautsky U, 2016. Reactive transport model of Uranium mobility in the riparian zone. I Proceedings of the 2nd International Conference in Radioecological Processes, Sevilla, Spanien, 6–9 november 2016.

af Ekenstam G, Hildingsson L, Fagerholm R, Andersson C, 2018. Elements of a Swedish safeguards policy for a spent fuel disposal system. ESARDA Bulletin 56, 36–42.

Agrenius L, Spahiu K, 2016. Criticality effects of long-term changes in material compositions and geometry in disposal canisters. SKB TR-16-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ahlfors K, 2021. Bestämning av svärmätbara nuklider i avfall från nedmontering och rivning. SKBdoc 1935344 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Anderson C, Pedersen K, Jakobsson A-M, 2006a. Autoradiographic comparisons of radionuclide adsorption between subsurface anaerobic biofilms and granitic host rocks. Geomicrobiology Journal 23, 15–29.

Anderson C R, James R E, Chi Fru E, Kennedy C B, Pedersen K, 2006b. *In situ* ecological development of a bacteriogenic iron oxide-producing microbial community from a subsurface granitic rock environment. Geobiology 4, 29–42.

Andersson E, 2010. The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SKB TR-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson P, Nilsson K, Löfgren M, 2020. Task description of Task 9C – Modelling of REPRO experiment TDE. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB P-17-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson-Östling H C M, 2020. Creep testing of copper intended for nuclear waste disposal – overview of studies from 1985 to 2018. SKB TR-20-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Andersson-Östling H, Sundström R, 2021. SSRT testing of Cu with increased content of Zn-Bi-Te. Swerim AB. SKBdoc 1917201 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Applegate D, Appleyard P, Joyce S, 2020. Modelling solute transport and water–rock interactions in discrete fracture networks. Posiva Working Report 2020-01, Posiva Oy, Finland.

Appleyard P, 2021. Discrete fracture network simulations in support of hydraulic rejection criteria for deposition holes. Posiva SKB Report 11, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Aquilonius K (red), 2010. The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Aro L, 2021. Safety case for the operating licence application: Description and data of the surface environment 3 – Forests and mires. Posiva Working Report 2019-13, Posiva Oy, Finland.

Arvidsson A, Josefsson P, Eriksson P, Sandén T, Ojala M, 2015. System design of backfill. Project results. SKB TR-14-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Backers T, 2005. Fracture toughness determination and micromechanics of rock under mode I and mode II loading. Doktorsavh. Potsdam: GeoForschungsZentrum. (Scientific Technical Report STR; 05/05)

Backers T, Stephansson O, 2012. ISRM suggested method for the determination of mode II fracture toughness. Rock Mechanics and Rock Engineering 45, 1011–1022.

Bamforth P, Baston G, Berry J, Glasser F, Heath T, Jackson C, Savage D, Swanton S, 2012. Cement materials for use as backfill, sealing and structural materials in geological disposal concepts. A review of current status. Report to NDA RWMD. SERCO/005125/001 Issue 3, Serco, Storbritannien.

- Barreiro Fidalgo A, Roth O, Evins L Z, Spahiu K, 2021.** Aqueous leaching of Cr₂O₃-doped UO₂ spent nuclear fuel under oxidizing conditions. *MRS Advances* 6, 103–106.
- Bastviken D, Svensson T, Sandén P, Kylin H, 2013.** Chlorine cycling and fates of ³⁶Cl in terrestrial environments. SKB TR-13-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bastviken D, Nygren J, Schenk J, Parellada Massana, R, Duc N T, 2020.** Technical note: Facilitating the use of low-cost methane (CH₄) sensors in flux chambers – calibration, data processing, and an open-source make-it-yourself logger. *Biogeosciences* 17, 3659–3667.
- Beckel R A, Juhlin C, 2019.** The cross-dip correction as a tool to improve imaging of crooked-line seismic data: a case study from the post-glacial Burträsk fault, Sweden. *Solid Earth* 10, 581–598.
- Beckel R A, Lund B, Eggertsson G A, Juhlin C, 2022.** Comparing the performance of stacking-based methods for microearthquake location: a case study from the Burträsk fault, northern Sweden. *Geophysical Journal International* 228, 1918–1934.
- Becker K, 2021.** Beräkning av dosbelastning för genomförande av reparationsarbete i 1BMA. SKBdoc 1963944, ver 1.0. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Becker R, Forsström A, Yagodzinskyy Y, Hänninen H, Heikkilä M, 2020.** Sulphide-induced stress corrosion cracking and hydrogen absorption in copper exposed to sulphide and chloride containing deoxygenated water at 90 °C. SSM report 2020:01, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Behazin M, Pedersen K, Li L, Abrahamsen-Mills L, Boylan A, Bryan N, 2021.** State of science review of sulfide production in deep geological repositories for used nuclear fuel. NWMO-TR-2021-18, Nuclear Waste Management Organisation, Kanada.
- Bengtsson A, Blom A, Hallbeck B, Heed C, Johansson L, Stahlén J, Pedersen K, 2017.** Microbial sulphide-producing activity in water saturated MX-80, Asha and Calcigel bentonite at wet densities from 1500 to 2000 kg m⁻³. SKB TR-16-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bengtsson M, Jansson P, Bäckström U, Johansson F, Sjöland A, 2022.** Experimental method for verification of calculated ¹³⁷Cs content in nuclear fuel assemblies. *Nuclear Technology* 208, 295–302.
- Berglund J-Å, Lorenz H, De la Gardie F, Herschend B, 2016.** Friklassning vid nedmontering och rivning av kärntekniska anläggningar. SKB R-16-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Berglund S, Bosson E, Sassner M, 2013.** From site data to safety assessment – Analysis of present and future hydrological conditions at a coastal site in Sweden. *Ambio* 42, 425–434.
- Betova I, Bojonov M, Lilja C, 2021.** Influence of ionic strength on hydrogen generation during interaction of copper with deoxygenated neutral solution. *Corrosion Science* 188, 109552. doi:10.1016/j.corsci.2021.109552
- Birgersson M, Goudarzi R, 2017.** Summary report on “sauna” effects. SKB TR-17-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Birgersson M, Goudarzi R, 2018.** Investigations of gas evolution in an unsaturated KBS-3 repository. SKB TR-18-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Björklund V, 2021.** The effects of static strain aging on the mechanical performance of nodular cast iron. Masteruppsats. Helsingfors: Aalto Universitet.
- Bosch J A, Ferrari A, Laloui L, 2020a.** A coupled hydro – mechanical approach for modelling the volume change behaviour of compacted bentonite. *E3S Web of Conferences* 195, 04006. doi:10.1051/e3sconf/202019504006
- Bosch J A, Ferrari A, Laloui L, 2020b.** A numerical study on the coupled hydro-mechanical behavior of compacted bentonite. *E3S Web of Conferences* 205, 10001. doi:10.1051/e3sconf/202020510001
- Brandefelt J, Näslund J-O, Zhang Q, Hartikainen J, 2013.** The potential for cold climate conditions and permafrost in Forsmark in the next 60,000 years. SKB TR-13-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Briggs S, Lilja C, King F, 2020.** Probabilistic model for the pitting of copper canisters under aerobic, saturated conditions. SKB TR-20-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Briggs S, Lilja C, King F, 2021.** Probabilistic model for pitting of copper canisters. *Materials and Corrosion* 72, 308–316.

- Brown J, Telleria D, Yankovich T, Cabcianca, T, Halsall C, 2022.** Overview of the MODARIA programme (and comments on implications for future programmes of work). *Journal of Radiological Protection* 42, 020505. doi:10.1088/1361-6498/ac5bdd
- Bruno J, González-Siso M R, Duro L, Gaona X, Altmaier M, 2018.** Key master variables affecting the mobility of Ni, Pu, Tc, and U in the near field of the SFR repository. Main experimental findings and PA implications of the PhD thesis. SKB TR-18-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, Strömgren M, 2010.** A coupled regolith-lake development model applied to the Forsmark site. SKB TR-10-56, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Brydsten L, Strömgren M, 2013.** Landscape development in the Forsmark area from the past into the future (8500 BC – 40,000 AD). SKB R-13-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Böövarsson R, Lund B, Roberts R, Slunga R, 2006.** Earthquake activity in Sweden. Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn. SKB R-06-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Sandén T, Dueck A, Andersson L, Jensen V, Nilsson U, Olsson S, Åkesson M, Kristensson O, Svensson U, 2015.** Consequences of water inflow and early water uptake in deposition holes. EVA Project. SKB TR-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cachoir C, Mennecart T, Lemmens K, 2021.** Evolution of the uranium concentration in dissolution experiments with Cr-(Pu) doped UO₂ in reducing conditions at SCK CEN. *MRS Advances* 6, 84–89.
- Calderon M, 2014.** Struktur på avvecklingsplan för kärntekniska anläggningar ”guideline”. SKBdoc 1416378 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Carlsson A, 1979.** Characteristic features of a superficial rock mass in southern Sweden: horizontal and subhorizontal fractures and filling material. Doktorsavh. Uppsala universitet.
- Carlsten S, Stråhle A, 2000.** Borehole radar and BIPS investigations in boreholes at the Boda area. SKB TR-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Chan N X, 2014.** One- and three-dimensional P- and S-wave velocity models of Central and Southern Sweden based on SNSN Data. Examensarbete. Uppsala universitet.
- Chen J, Guo M, Martino T, Ramamurthy S, Noël J J, Shoemith D W, Lilja C, Johansson A J, 2019.** The distribution of corrosion damage to copper surfaces exposed to aqueous sulphide solutions. SKBdoc 1706406 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Chernyshev A N, Jonsson M, Forsberg K, 2018.** Characterization and degradation of a polyaryl ether based superplasticizer for use in concrete barriers in deep geological repositories. *Applied Geochemistry* 95, 172–181.
- Chernyshev A N, Maier A C, Jonsson M, Forsberg K, 2021.** Solubilisation of Ni(II) and Eu(III) through complexation with a polyaryl ether based superplasticizer in alkaline media. *Chemosphere* 263, 127686. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.127686
- Claesson Liljedahl L, Kontula A, Harper J, Näslund J-O, Selroos J-O, Pitkänen P, Puigdomenech I, Hobbs M, Follin S, Hirschorn S, Jansson P, Kennell L, Marcos N, Ruskeeniemi T, Tullborg E-L, Vidstrand P, 2016.** The Greenland Analogue Project: Final report. SKB TR-14-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Claesson Liljedahl L, Meierbachtol T, Harper J, van As D, Näslund J O, Selroos J-O, Saito J, Follin S, Ruskeeniemi T, Kontula A, Humphrey N, 2021.** Rapid and sensitive response of Greenland’s groundwater system to ice sheet change. *Nature Geoscience* 14, 751–755.
- Colgan W, Wansing A, Mankoff K, Lösing M, Hopper J, Loudon K, Ebbing J, Christiansen F G, Ingeman-Nielsen T, Claesson Liljedahl L, MacGregor J A, Hjartarson Á, Bernstein S, Karlsson N B, Fuchs S, Hartikainen J, Liakka J, Fausto R, Dahl-Jensen D, Bjørk A, Näslund J-O, Mørk F, Martos Y, Balling N, Funck T, Kjeldsen K K, Petersen D, Gregersen U, Dam G, Nielsen T, Khan A, Løkkegaard A, 2022.** Greenland geothermal heat flow database and map (Version 1). *Earth Systems Science Data* 14, 2209–2238.
- Colleoni F, Liakka J, 2020.** Transient simulations of the Eurasian ice sheet during the Saalian glacial cycle. SKB TR-19-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Cordara T, Smith H, Mohun R, Gardner L J, Stennett M C, Hyatt N C, Corkhill C L, 2020.** Hot Isostatic Pressing (HIP): A novel method to prepare Cr-doped UO₂ nuclear fuel. *MRS Advances* 5, 45–53.
- Crawford J, Löfgren M, 2019.** Modelling of radionuclide retention by matrix diffusion in a layered rock model. SKB R-17-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Crawford J, Soler J M, Trincherro P, Hokr M, Havlová V, Vetešník A, Gvoždík L, Milický M, Polák M, Reimitz D, Říha J, Trpkošová D, Višňák J, Vopálka D, Meng S, Moreno L, Liu L, Svensson U, 2022.** Evaluation and modelling report of Task 9D regarding safety assessment calculations based on gained knowledge within Task 9. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB R-21-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Curti E, Kulik D A, 2020.** Oxygen potential calculations for conventional and Cr-doped UO₂ fuels based on solid solution thermodynamics. *Journal of Nuclear Materials* 534, 152140. doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152140
- Cuss R J, Harrington J F, Noy D J, 2010.** Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report 2008. SKB TR-10-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cvetkovic V, Poteri A, Selroos J-O, Zou L, 2020.** Inference of retention time from tracer tests in crystalline rock. *Water Resources Research* 56. doi:10.1029/2019WR025266
- Dahlqvist R, Andersson K, Ingri J, Larsson T, Stolpe B, Turner D, 2007.** Temporal variations of colloidal carrier phases and associated trace elements in a boreal river. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 5339–5354.
- Dalton A S, Pico T, Gowan E J, Clague J J, Forman S L, McMartin I, Sarala P, Helmens K F, 2022.** The marine δ¹⁸O record overestimates continental ice volume during Marine Isotope Stage 3. *Global and Planetary Change* 212, 103814. doi:10.1016/j.gloplacha.2022
- Damjanac B, Fairhurst C, 2010.** Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43, 513–531.
- Daniels K A, Harrington J F, Sellin P, Norris S, 2021.** Closing repository void spaces using bentonite: does heat make a difference? *Applied Clay Science* 210, 106124. doi:10.1016/j.clay.2021.106124
- Darcel C, Le Goc R, Doolaeghe D, Ghazal R, Davy P, 2021a.** Rock mass effective properties from a DFN approach. Phase 1 – Elastic properties. SKB R-20-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Darcel C, Davy P, Le Goc R, Selroos J-O, Mas Ivars D, 2021b.** Permeability: factoring stress dependency into the permeability of fractured rocks. American Geophysical Union Fall Meeting 2021, New Orleans, LA, 13–17 december 2021, H42E-08.
- Dario M, Molera M, Allard B, 2004.** Effect of organic ligands on the sorption of europium on TiO₂ and cement at high pH. SKB TR-04-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Davy P, Darcel C, Le Goc R, Mas Ivars D, 2018.** Elastic properties of fractured rock masses with frictional properties and power law fracture size distributions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, 6521–6539.
- Delgado-Martín J, Muñoz-Ibáñez A, Herbón-Penabad M, Alejano L R, 2021a.** Sample size effects on intact granitic rocks through uniaxial compressive and tensile testing and geophysical measurements. SKB P-20-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Delgado-Martín J, Muñoz-Ibáñez A, Herbón-Penabad M, Alejano L R, 2021b.** Fracture toughness using pseudo-compact tension (pCT) test and semi-circular bending specimen (SCB) test. SKB P-21-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Delgado-Martín J, Herbón-Penabad M, Muñoz-Ibáñez A, 2022.** Fracture toughness tests on rock cores from borehole KFM06A using the pseudo-compact tension (pCT) method. SKB P-22-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- De Windt L, Goblet P, Kerleguer V, Jegou C, 2021.** Modeling of U_{0.73}Pu_{0.27}O₂ radiolytic dissolution as a simulant of the alteration of MOX fuel matrices in an underground disposal cell. Deliverable D5.7, DisCo project (Grant Agreement 755443), Euratom Research and Training Programme on Nuclear Energy, Horizon 2020 Framework Programme, European Commission.

- Doolaeghe D, 2021.** Colmatage des réseaux de fractures, modèles et conséquences hydrologiques. Doktorsavh. Université de Rennes, Frankrike.
- Doolaeghe D, Davy P, Hyman J D, Darcel C, 2020.** Graph-based flow modeling approach adapted to multiscale discrete-fracture-network models. *Physical Review E* 102, 053312. doi:10.1103/PhysRevE.102.053312
- Dueck A, Börgesson L, 2021.** Bentonite homogenisation. Three studies based on laboratory test results. SKB P-21-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Dueck A, Goudarzi, Jensen V, Börgesson L, 2022.** Buffer homogenisation – status report 5. SKB TR-21-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Duro L, Grivé M, Gaona X, Bruno J, Andersson T, Borén H, Dario M, Allard B, Hagberg J, Källström K, 2012.** Study of the effect of the fibre mass UP2 degradation products on radionuclide mobilisation. SKB R-12-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Edelborg M, Anunti Å, Oliver L, Lundkvist N, Leveau N, 2014.** Decommissioning study of Clink. SKB R-13-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ekeröth E, Granfors M, Schild D, Spahiu K, 2020.** The effect of temperature and fuel surface area on spent nuclear fuel dissolution kinetics under H₂ atmosphere. *Journal of Nuclear Materials* 531, 151981. doi:10.1016/j.jnucmat.2019.151981
- El Jamal G, 2021.** Redox reactions of uranium-based materials in aqueous systems and under UHV conditions: Two models mimicking radiation-induced oxidation of spent nuclear fuel. Doktorsavh. KTH.
- El Jamal, G, Gouder, T, Eloirdi R, Jonsson M, 2021a.** Time-dependent surface modification of uranium oxides exposed to water plasma. *Dalton Transactions* 50, 4796–4804.
- El Jamal G, Gouder T, Eloirdi R, Jonsson M, 2021b.** X-Ray and ultraviolet photoelectron spectroscopy studies of Uranium (IV), (V) and (VI) exposed to H₂O-plasma under UHV conditions. *Dalton Transactions* 50, 729–738.
- El Jamal G, Gouder T, Eloirdi R, Tereshina-Chitrova E, Horákd L, Jonsson M, 2021c.** Mixed H₂O/H₂ plasma-induced redox reactions of thin uranium oxide films under UHV conditions. *Dalton Transactions* 50, 12583–12591.
- El Jamal G, Li J, Jonsson M, 2021d.** H₂O₂-induced oxidative dissolution of UO₂ in saline solutions. *European Journal of Inorganic Chemistry* 2021, 4175–4182.
- Enzell J, Malm R, 2019.** Full-scale test of the Dome plug for KBS-3V deposition tunnels. Project summary and evaluation of the final results. SKB TR-18-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson D, 2021.** Hållfasthetsutredning av ytterväggar i 1BMA belastade av återfyllnadstryck. DMG 1009682 V0.4, Vattenfall AB. SKBdoc 1954971 ver 1.0, Svensk kärnbränslehantering AB.
- Eriksson P, 2019.** Development of thermo-hydraulic model for pellet fillings. SKB P-19-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson P, 2020.** Effects of water inflow to deposition hole during the installation phase. SKB R-20-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Evins L Z, 2020.** On the barrier function of spent fuel cladding. SKBdoc 1912057 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Evins L Z, Hedin A, 2020.** Failed fuel in special containers: potential contribution to risk calculated in the post-closure safety for the spent nuclear fuel repository. SKBdoc 1872793 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Evins L Z Duro L, Valls A, Corkhill C, Myllykylä E, Farnan I, Bosbach D, Metz V, Maldonado P, 2020.** Spent nuclear fuel dissolution results from completed project REDUPP and ongoing project DisCo. I Constantin A, Diaconu D (red). EURADWASTE '19: 9th European Commission conference on Euratom research and training in radioactive waste management: conference proceedings. European Union, 235–246. doi:10.2777/64867

- Favalli A, Vo D, Grogan B, Jansson P, Liljenfeldt H, Mozin V, Schwalbach P, Sjöland A, Tobin S J, Trelue H, Vaccaro S, 2016.** Determining initial enrichment, burnup, and cooling time of pressurized-water-reactor spent fuel assemblies by analyzing passive gamma spectra measured at the Clab interim-fuel Storage facility in Sweden. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 820, 102–111.
- Felde V A, Flantua S G A, Jenks C R, Benito B M, de Beaulieu J-L, Kuneš P, Magri D, Nalepka D, Risebrobakken B, ter Braak C J F, Allen J R M, Granoszewski W, Helmens K F, Huntley B, Kondratienė O, Kalnina L, Kupryjanowicz M, Malkiewicz M, Milner A M, Nita M, Noryškiewicz B, Pidek I A, Reille M, Salonen J S, Šeirienė V, Winter H, Tzedakis P C, Birks H J B, 2020.** Compositional turnover and variation in Eemian pollen sequences in Europe. *Vegetation History and Archaeobotany* 29, 101–109.
- Fenton C H, Adams J, Halchuk S, 2006.** Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity. *Geotechnical and Geological Engineering* 24, 579–592.
- Ferrari A, Bosch J A, Baryla P, Rosone M, 2022.** Volume change response and fabric evolution of granular MX80 bentonite along different hydro-mechanical stress paths. *Acta Geotechnica*. doi:10.1007/s11440-022-01481-0
- Fidalgo A B, Roth O, Puranen A, Evins L Z, Spahiu K, Askeljung C, 2019.** Powder leaching study for grain boundary inventory of two high burnup fuels. *MRS Advances* 4, 981–986.
- Fidalgo A, Roth O, Puranen A, Evins L Z, Spahiu K, 2020.** Aqueous leaching of ADOPT and standard UO₂ spent nuclear fuel under H₂ atmosphere. *MRS Advances* 5, 167–175.
- Figueiredo B, Sjöberg J, Mas Ivars D, 2020.** Use of a fully tensorial approach to characterize the stress variability at Forsmark. I Billaux D, Hazzard J, Nelson M, Schöpfer M (red). *Applied numerical modeling in geomechanics: Proceedings of the 5th International Itasca Symposium*, 16–20 februari 2020, Paper 12-08.
- Finné M, Salonen J S, Frank N, Helmens K F, Schröder-Ritzrau A, Deininger M, Holzkämper S, 2019.** Last Interglacial climate in northern Sweden – Insights from a speleothem record. *Quaternary* 2. doi:10.3390/quat2030029
- Forsström A, Yagodzinskyy Y, Hänninen H, 2019.** Hydrogen effects on mechanical performance of nodular cast iron. *Corrosion Reviews* 37, 441–454.
- Forsström A, Becker R, Hänninen H, Yagodzinskyy Y, Heikkilä M, 2021.** Sulphide-induced stress corrosion cracking and hydrogen absorption of copper in deoxygenated water at 90 °C. *Materials and Corrosion* 72, 317–332.
- FracMan, 2022.** FracMan, version 8. Golder Associates Ltd, Storbritannien. Retrieved from www.golder.com/fracman
- Fujiwara K, Tani J, Hironaga M, Tanaka M, 2017.** Corrosion behaviour of aluminium under simulated environmental conditions of low-level waste. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, 162–165.
- Fälth B, 2018.** Simulating earthquake rupture and near-fault fracture response. Doktorsavh. Uppsala universitet.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2007.** Seismically Induced Shear Displacements in Repository Host Rock Fractures. I Proceedings of the 9th Canadian conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Kanada, 26–29 juni 2007.
- Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2008.** Seismically induced slip on rock fractures – expanded study with particular account of large earthquakes. I Proceedings of the 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium, San Fransisco, Kalifornien, 29 juni – 2 juli 2008.
- Fälth B, Hökmark H, Lund B, Mai P M, Roberts R, Munier R, 2014.** Simulating earthquake rupture and off-fault fracture response: Application to the safety assessment of the Swedish nuclear waste repository. *Bulletin of the Seismological Society of America* 105, 134–151.
- Fälth B, Hökmark H, Lund B, 2016.** Simulation of co-seismic secondary fracture displacements for different earthquake rupture scenarios at the proposed nuclear waste repository site in Forsmark. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 84, 142–158.

- Fälth B, Lund B, Hökmark H, 2017.** Simulation of co-seismic off-fault stress effects: influence of fault roughness and pore pressure coupling. I Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans, Louisiana, 11–15 december 2017.
- Fälth B, Lönnqvist M, Hökmark H, 2019.** Co-seismic secondary fracture displacements under different stress conditions. Posiva Working Report 2019-10, Posiva Oy, Finland.
- Gao K, Harrison J P, 2018a.** Multivariate distribution model for stress variability characterisation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 102, 144–154.
- Gao K, Harrison J P, 2018b.** Scalar-valued measures on stress dispersion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 106, 234–242.
- Gaona X, Tasi A, Szabo P, 2021.** Impact of the degradation products of the UP2 resin on the uptake of radionuclides by cement: Progress update on the first year of the project. Karlsruhe Institute of Technology. SKBdoc 1925094 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gens A, Pomaro B, Sánchez M, Villar MV, 2018.** On the hydration of unsaturated barriers for high-level nuclear waste disposal unsaturated soils. I *Unsaturated soils: UNSAT 2018: The 7th International Conference on Unsaturated Soils*. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), 55–60.
- Glaus M A, Van Loon L R, 2004.** A generic procedure for the assessment of the effect of concrete admixtures on the retention behaviour of cement for radionuclides: concept and case studies. PSI Bericht 04-02, Paul Scherrer Institute, Schweiz. Nagra Technical Report NTB 03-09, Nagra, Schweiz.
- Glaus M A, Van Loon L R, 2008.** Degradation of cellulose under alkaline conditions: new insights from a 12 year degradation study. *Environmental Science & Technology* 42, 2906–2911.
- Glaus M A, Van Loon L R, Achatz S, Chodura A, Fischer K, 1999.** Degradation of cellulosic materials under the alkaline conditions of a cementitious repository for low and intermediate level radioactive waste. Part I: Identification of degradation products. *Analytica Chimica Acta* 398, 111–122.
- González-Siso M R, 2018.** Determination of key master variables and radionuclide behavior in the Swedish Final Repository environment. Doktorsavh. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Goodfellow B W, Stroeven A P, Martel S J, Heyman J, Rossi M, Caffee M W, 2019.** Exploring alternative models for the formation of conspicuously flat basement surfaces in southern Sweden. SKB TR-19-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gordon A, Sjögren L, Taxén C, Johansson A J, 2017.** Retrieval and post-test examination of packages 4 and 5 of the MiniCan field experiment. SKB TR-16-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Granfors M, 2017.** Round-robin of hydrogen content in copper determined by melt extraction and gas analysis. SKB R-17-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grenthe I, Gaona X, Plyasunov A V, Rao L, Runde W H, Grambow B, Konings R J M, Smith A L, Moore E E, Ragoussi M E, Martinez J S, 2020.** Chemical thermodynamics. Vol 14, Second update on the chemical thermodynamics of uranium, neptunium, plutonium, americium and technetium. Boulogne-Billancourt, France: OECD Nuclear Energy Agency.
- Griffault L, Aubonnet E, Brown J, Guerfi R, Kautsky U, Kowe R, Saetre P, Shibutani S, Smith G, Smith K, Thorne M, Walke R, 2022.** Approaches to the definition of potentially exposed groups and potentially exposed populations of biota in the context of solid radioactive waste. *Journal of Radiological Protection* 42, 020515. doi:10.1088/1361-6498/ac6045
- Grolander S, 2013.** Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU. SKB R-13-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Grolander S, Jaeschke B, 2019.** Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SE-SFL. SKB R-19-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gudasz C, Karlsson J, Bastviken D, 2021.** When does temperature matter for ecosystem respiration? *Environmental Research Communications* 3, 121001. doi:10.1088/2515-7620/ac3b9f
- Gunia M, Gunia K, 2022.** UNTAMO model description. Model version 3.5. SKB P-21-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Gunia K, Gunia M, Seppänen A, Strömgren M, 2021.** Terrain and ecosystem modelling for the Forsmark area. Comparison of the regolith-lake development model and the Untamo model. SKB R-20-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Guo M, Chen J, Martino T, Biesinger M, Noël J J, Shoesmith D W 2019.** The susceptibility of copper to pitting corrosion in borate-buffered aqueous solutions containing chloride and sulfide. *Journal of The Electrochemical Society* 166, C550–C558.
- Guo M, Chen J, Lilja C, Dehnavi V, Behazin M, Noël J J, Shoesmith D W, 2020.** The anodic formation of sulfide and oxide films on copper in borate-buffered aqueous chloride solutions containing sulphide. *Electrochimica Acta* 362, 137087. doi:10.1016/j.electacta.2020.137087
- Guo M, Chen J, Martino T, Lilja C, Johansson J A, Behazin M, Binns W J, Keech P G, Noël J J, Shoesmith D W, 2021.** The nature of the copper sulfide film grown on copper in aqueous sulfide and chloride solutions. *Materials and Corrosion* 72, 300–307.
- Gålfalk M, Nilsson Påledal S, Bastviken D, 2021.** Sensitive drone mapping of methane emissions without the need for supplementary ground-based measurements. *ACS Earth and Space Chemistry* 5, 2668–2676.
- Gålfalk M, Påledal, S N, Sehlén R, Bastviken D, 2022.** Ground-based remote sensing of CH₄ and N₂O fluxes from a wastewater treatment plant and nearby biogas production with discoveries of unexpected sources. *Environmental Research* 204, 111978. doi:10.1016/j.envres.2021.111978
- Hagström J, Sundström R, Andersson-Östling H C M, 2020.** CSL grain boundaries in cold rolled copper after annealing at different times and temperatures. Swerim AB. SKBdoc 1887107 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakala M, Siren T, Kempainen K, Christiansson R, Martin D, 2013.** In situ stress measurement with the new LVDT-cell – method description and verification. Posiva 2012-43, Posiva Oy, Finland.
- Hakala M, Ström J, Valli J, Juvani J, 2019.** Structural control on stress variability at Forsmark. SKB R-19-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakami E, Holmberg J, 2021.** Overcoring of pilot hole in KFM24. Evaluation of the required conditions for future overcoring stress measurements. SKB P-21-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hakami E, Mas Ivars D, Darcel C, 2022.** Methodology for rock mechanics modelling of the Forsmark site. SKB R-20-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hall A M, Ebert K, Goodfellow B W, Hättstrand C, Heyman J, Krabbendam M, Moon S, Stroeven A P, 2019a.** Past and future impact of glacial erosion in Forsmark and Uppland. Final report. SKB TR-19-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hall A M, Krabbendam M, van Boeckel M, Hättstrand C, Ebert K, Heyman J, 2019b.** The sub-Cambrian unconformity in Västergötland, Sweden. Reference surface for Pleistocene glacial erosion of basement. SKB TR-19-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hall A M, Krabbendam M, van Boeckel M M, Goodfellow B W, Hättstrand C, Heyman J, Palamakumbara R N, Stroeven A P, Näslund J-O, 2020.** Glacial ripping: geomorphological evidence from Sweden for a new process of glacial erosion. *Geografiska Annaler, Series A* 102. doi:10.1080/04353676.2020.1774244
- Hall D S, Behazin M, Binns W J, Keech P G, 2021.** An evaluation of corrosion processes affecting copper-coated nuclear waste containers in a deep geological repository. *Progress in Materials Science* 118, 100766.
- Halldin Stenlid J, Campos dos Santos E, Johansson A J, Pettersson L G M, 2019.** On the nature of the cathodic reaction during corrosion of copper in anoxic sulfide solutions. *Journal of the Electrochemical Society* 166, C196–C208.
- Halldin Stenlid J, Campos dos Santos E, Bagger A, Johansson A J, Rossmesl J, Pettersson L G M, 2020a.** Electrochemical interface during corrosion of copper in anoxic sulfide-containing groundwater – A computational study. *The Journal of Physical Chemistry C* 124, 469–481.
- Halldin Stenlid J, Campos dos Santos E, Arán-Ais R M, Bagger A, Johansson A J, Cuenya B R, Rossmesl J, Pettersson L G M, 2020b.** Uncovering the electrochemical interface of low-index copper surfaces in deep groundwater environments. *Electrochimica Acta* 362, 137111. doi:10.1016/j.electacta.2020.137111

- Halldin Stenlid J, Campos dos Santos E, Johansson A J, Pettersson L G M, 2021.** Properties of interfaces between copper and copper sulphide/oxide films. *Corrosion Science* 183, 109313. doi:10.1016/j.corsci.2021.109313
- Hansson N L, 2020.** The Influence of hydrogen on the radiolytic oxidation of UO₂. Lic-avh. Chalmers tekniska högskola.
- Hansson N L, Ekberg C, Spahiu K, 2020.** Alpha dose rate calculations for UO₂ based materials using stopping power models. *Nuclear Materials and Energy* 22, 100734. doi:10.1016/j.nme.2020.100734
- Hansson N L, Tam P L, Ekberg C, Spahiu K, 2021.** XPS study of external α -radiolytic oxidation of UO₂ in the presence of argon or hydrogen. *Journal of Nuclear Materials* 543, 152604. doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152604
- Hardacre C J, Heal M R, 2013.** Characterization of methyl bromide and methyl chloride fluxes at temperate freshwater wetlands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, 977–991.
- Harper J, Hubbard A, Ruskeeniemi T, Claesson Liljedahl L, Kontula A, Hobbs M, Brown J, Dirkson A, Dow C, Doyle S, Drake H, Engström J, Fitzpatrick A, Follin S, Frape S, Graly J, Hansson K, Harrington J, Henkemans E, Hirschorn S, Humphrey N, Jansson P, Johnson J, Jones G, Kinnbom P, Kennell L, Klint K E S, Liimatainen J, Lindbäck K, Meierbachtol T, Pere T, Pettersson R, Tullborg E-L, van As D, 2016.** The Greenland Analogue Project: Data and processes. SKB R-14-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Harper J, Humphrey N, Meierbachtol T, 2019.** Greenland ICE Project. Final report. SKB R-18-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Harrington J F, Daniels K A, Wiseall A C, Sellin P, 2020.** Bentonite homogenisation during the closure of void spaces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 136, 104535. doi:10.1016/j.ijrmms.2020.104535
- Hartikainen J, Kouhia R, Wallroth T, 2010.** Permafrost simulations at Forsmark using a numerical 2D thermo-hydro-chemical model. SKB TR-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hartikainen J, Näslund J O, Liakka J, Claesson Liljedahl L, Kolisoja P, Kouhia R, 2022.** Evaluation of the SR-Site and SR-PSU permafrost models against GAP-site bedrock temperatures. SKB TR-21-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hartley L, Baxter S, Bym T, Cottrell M, Libby S, 2021.** Exploring the effects of tunnel construction on the hydraulic acceptance of deposition holes. Posiva Working Report 2021-17, Posiva Oy, Finland.
- He J, Sandström R, 2019.** Application of fundamental models for creep rupture prediction of Sanicro 25 (23Cr25NiWCoCu). *Crystals* 9, 638. doi:10.3390/cryst9120638
- Hedström M, 2022.** Sulfide diffusion in MX-80: Feasibility of detection by use ion-selective electrodes. SKBDoc 1981275 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedström S, 2019a.** Komplexbildande flyttillsatsmedel i kringgjutningsbetong i kokiller till SFR. SKBdoc 1870598 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hedström S, 2019b.** Komplexbildande flyttillsatsmedel i kringgjutnings-, solidifierings- och lockgjutningsbruk i kokiller till SFR. SKBdoc 1879757 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, 2009.** Climate, vegetation and lake development at Sokli (northern Finland) during early MIS 3 at ~50 kyr: Revising earlier concepts on climate, glacial and vegetation dynamics in Fennoscandia during the Weichselian. SKB TR-09-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, 2013.** The last interglacial-glacial cycle (MIS 5-2) re-examined based on long proxy records from central and northern Europe. SKB TR-13-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, 2019.** The last 130 000 years in Fennoscandia reconstructed based on a long and fossil-rich sediment sequence preserved at Sokli, northern Finland: new evidence for highly dynamic environmental and climate conditions. SKB TR-18-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Helmens K F, Katrantsiotis C, Kuosmanen N, Luoto T P, Salonen J S, Väiliranta M, 2021.** Prolonged interglacial warmth during the Last Glacial in northern Europe. *Boreas* 50, 331–350.
- Henshaw J, Spahiu K, 2021.** Radiolysis calculations of air, argon and water mixtures in a KBS-3 canister. SKB TR-21-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Herm M, González-Robles E, Walschburger A, Müller N, Bohnert E, Böttle M, Geyer F, Fuss M, Metz V, 2020. Status of leaching experiments performed with irradiated MOX fuel in bicarbonate water under hydrogen overpressure at KIT-INE. I Evins L Z, Valls A, Duro L (red). 3rd Annual Meeting Proceedings. Deliverable D1.20, DisCo project, (Grant Agreement 755443), Euratom Research and Training Programme on Nuclear Energy, Horizon 2020 Framework Programme, European Commission.

Hernandez-Solis A, Ambrožič K, Čalič D, Fiorito L, Kos B, Kromar M, Schillebeeckx P, Stankovskiy A, Žerovnik G, 2021. Boundary condition modeling effect on the spent fuel characterization and final decay heat prediction from a PWR assembly. EPJ Web of Conferences 247, 12008. doi:10.1051/epjconf/202124712008

Herting G, Odnevall I, 2021. Corrosion of aluminium and zinc in concrete at simulated conditions of the repository of low active waste in Sweden. Corrosion and Materials Degradation 2, 150–162.

Hidaka H, Holliger P, 1998. Geochemical and neutronic characteristics of the natural fossil fission reactors at Oklo and Bangombé, Gabon. Geochimica et Cosmochimica Acta 62, 89–108.

Hoch A R, Lever D A, Shaw G, 2014. Uptake of carbon-14 in the biosphere: Summary report. NPO004437, AMEC, UK.

Hoek E, Brown E T, 1980. Underground excavations in rock. London: Institute of Mining and Metallurgy.

Hora S, Jensen M, 2005. Expert panel elicitation of seismicity following glaciation in Sweden. SSI Report 2005:20, Statens strålskyddsinstitut.

Hornum M T, Hodson A J, Jessen S, Bense V, Senger K, 2020. Numerical modelling of permafrost spring discharge and open-system pingo formation induced by basal permafrost aggradation. The Cryosphere 14, 4627–4651.

Hornum M T, Betlem P, Hodson A, 2021. Groundwater flow through continuous permafrost along geological boundary revealed by electrical resistivity tomography. Geophysical Research Letters 48, e2021GL092757. doi:10.1029/2021GL092757

Huotilainen C, Ikäläinen T, Jäppinen E, Saario T, Sipilä K, 2020. Re-passivation rate of Cu-OFP. Research Report VTT-R-01153-20, VTT, Finland.

Hällgren A, 2018. Utredningsrapport – Grunden för en långsiktig kompetens-försörjning inom strålsäkerhetsområdet. SSM2017-134-23, Strålsäkerhetsmyndigheten.

Höglund L O, 2018. pH-utveckling i bergssal BRT. SKBdoc 1608409 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Höglund L O, 2019. pH evolution in 2BMA – assumptions, data and modelling results. Kemakta Konsult AB. SKBdoc 1698794 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010. THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hökmark H, Fälth B, Lönnqvist M, Munier R, 2019. Earthquake simulations performed to assess the long-term safety of a KBS-3 repository. Overview and evaluation of results produced after SR-Site. SKB TR-19-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

IAEA, 2006. Use of chlorofluorocarbons in hydrology: a guidebook. Wien: International Atomic Energy Agency.

IAEA, 2014. Modelling of biota dose effects: report of Working Group 6 Biota Dose Effects Modelling of EMRAS II Topical Heading Reference Approaches for Biota Dose Assessment. IAEA-TECDOC-1737, International Atomic Energy Agency, Wien.

IAEA, 2016. Environmental change in post-closure safety assessment of solid radioactive waste repositories. IAEA-TECDOC-1799, International Atomic Energy Agency, Wien.

IAEA, 2018. Prospective radiological environmental impact assessment for facilities and activities. Wien: International Atomic Energy Agency. (Safety Standard series GSG-10)

IAEA, 2021a. Radiation protection of wildlife: modelling the exposure and effects: joint summary report of- Working Groups 8 and 9 (MODARIA I) and Working Group 5 (MODARIA II): Modelling and Data for Radiological Impact Assessments (MODARIA) programme. IAEA-TECDOC-1986, International Atomic Energy Agency, Wien.

IAEA, 2021b. Soil–plant transfer of radionuclides in non-temperate environments: report of Working Group 4 Transfer Processes and Data for Radiological Impact Assessment Subgroup 3 on Non-temperate Data: IAEA Programme on Modelling and Data for Radiological Impact Assessments (MODARIA II). IAEA-TECDOC-1979, International Atomic Energy Agency, Wien.

Idiart A, Olmeda J, Laviña M, 2019. Modelling of concrete degradation – influence of concrete mix-design. Report for the safety evaluation SE-SFL. SKB R-19-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ikonen A T K, 2022. A review of sources, transport and losses of methane in the biosphere. SKB R-21-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ikonen K, 2020. Temperatures inside SKB and Posiva type disposal canisters for spent fuel. Posiva SKB Report 12, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ikäläinen T, Jäppinen E, Saario T, 2021. Susceptibility of Cu-OFP to SCC by acetate under aerated conditions. Posiva Working Report 2020-21, Posiva Oy, Finland.

Ikäläinen T, Saario T, Que Z, 2022. Creep rate in Cu-OFP, under applied electrochemical potential and presence of sulphide. SKB TR-22-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ingrí J, Conrad S, Lidman F, Nordblad F, Engström E, Rodushkin I, Porcelli D, 2018. Iron isotope pathways in the boreal landscape: Role of the riparian zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 239, 49–60.

Iraola A, Trinchero P, Voutilainen M, Gylling B, Selroos J-O, Molinero J, Svensson U, Bosbach D, Deissmann G, 2017. Microtomography-based Inter-Granular Network for the simulation of radionuclide diffusion and sorption in a granitic rock. *Journal of Contaminant Hydrology* 207, 8–16.

Iraola A, Trinchero P, Karra S, Molinero J, 2019. Assessing dual continuum method for multi-component reactive transport. *Computers & Geosciences* 130, 11–19.

Itasca, 2019. 3DEC, version 5.2: Distinct element modeling of jointed and blocky material in 3D. Minneapolis, MN: Itasca Consulting Group, Inc. Tillgänglig: <https://www.itascacg.com/software/3dec> [30 april 2019].

IUPAC, 1997. Compendium of chemical terminology (the "Gold Book"). McNaught A D, Wilkinson A (red). 2. uppl. Oxford: Blackwell Scientific Publications.

Jacobsson L, Appelquist K, Lindqvist J-E, Åkesson U, 2018. Spalling initiation experiments on large hard rock cores. SKB R-14-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Jacobsson L, Mas Ivars D, Kasani H A, Johansson F, Lam T, 2021. Experimental program on mechanical properties of large rock fractures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 833, 012015. doi:10.1088/1755-1315/833/1/012015

Jaeschke B, Smith K, Nordén S, Alfonso B, 2013. Assessment of risk to non-human biota from a repository for the disposal of spent nuclear fuel at Forsmark. Supplementary information. SKB TR-13-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Jansson P, Bengtsson M, Bäckström U, Grape S, Branger E, Sjöland A, 2020a. Time stamped list mode data from gamma-ray spectroscopic measurements on 47 nuclear fuel assemblies performed at Clab, Sweden, September 2016 through March 2019. Data in Brief 31, 106039. doi:10.1016/j.dib.106039

Jansson P, Bengtsson M, Bäckström U, Svensson K, Lycksell M, Sjöland A, 2020b. Data from calorimetric decay heat measurements of five used PWR 17x17 nuclear fuel assemblies. Data in Brief 28, 104917. doi:10.1016/j.dib.2019.104917

Jansson P, Bengtsson M, Bäckström U, Álvarez-Velarde F, Čalič D, Caruso S, Dagan R, Fiorito L, Giot L, Govers K, Solis A H, Hannstein V, Ilas G, Kromar M, Leppänen J, Mosconi M, Ortego P, Plukienė R, Plukis A, Ranta-Aho A, Rochman D, Ros L, Sato S, Schillebeeckx P, Shama A, Simeonov T, Stankovskiy A, Trelue H, Vaccaro S, Vallet V, Verwerft M, Žerovnik G, Sjöland A 2022a. Blind benchmark exercise for spent nuclear fuel decay heat. *Nuclear Science and Engineering* 196, 1125–1145.

- Jansson P, Renström P, Sarnet J, Sjöland A, 2022b.** A new methodology for thermal analysis of geological disposal of spent nuclear fuel using integrated simulations of gamma heating and finite element modeling. *Annals of Nuclear Energy* 172, 109082. doi:10.1016/j.anucene.2022.109082
- Jaquet O, Namar R, Siegel P, Harper J, Jansson P, 2019.** Groundwater flow modelling under transient ice sheet conditions in Greenland. SKB R-19-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jaremalm M, Köhler S, Lidman F, 2013.** Precipitation of barite in the biosphere and its consequences for the mobility of Ra in Forsmark and Simpevarp. SKB TR-13-28, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Javaid M A, Harrison J P, 2021.** Heterogeneity of *in situ* stress: A review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 833, 012058. doi:10.1088/1755-1315/833/1/012058
- Javaid M A, Harrison J P, Mas Ivars D, Kasani H, 2021.** Assessing heterogeneity of *in situ* stress for the design of nuclear waste repositories. I Proceedings of GeoNiagara 2021 – Creating a Sustainable and Smart Future, Niagara Falls, ON, Canada, 26–29 september.
- Johannesson L-E, Hermansson F, Kronberg, Bladström T, 2020.** Manufacturing of large scale buffer blocks. Uniaxial compaction of block – test made with three different bentonites. SKB R-19-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson A J, 2019.** Corrosion of copper in repository-like field tests: compilation and analysis of data. SKBdoc 1713264 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johansson A J, Lilja C, Sjögren L, Gordon A, Hallbeck L, Johansson L, 2017.** Insights from post-test examination of three packages from the MiniCan test series of coppercast iron canisters for geological disposal of spent nuclear fuel: impact of the presence and density of bentonite clay. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, 54–60.
- Johansson A J, Lilja C, Hedin A, 2019.** Corrosion of copper in repository-like field tests: compilation and analysis of data. IHLRWM 2019, Knoxville, TN, 14–18 april 2019.
- Johansson A J, Svensson D, Gordon A, Pahverk H, Karlsson O, Brask J, Lundholm M, Malmström D, Gustavsson F, 2020.** Corrosion of copper after 20 years exposure in the bentonite field test LOT S2 and A3. SKB TR-20-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, 2021a.** Impact of H₂ and Ar on the production of corrosive species in vapour exposed to gamma irradiation in canisters for spent nuclear fuel. SKB R-21-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jonsson M, 2021b.** Impact of groundwater constituents on radiation-induced corrosion of copper. SKBdoc 1883483 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Jutebring Sterte E, 2021.** Hydrology and water chemistry in a heterogeneous landscape: process-based modelling of coupled surface water and groundwater flow across contrasting boreal catchments. Doktorsavh. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.
- Jutebring Sterte E, Johansson E, Sjöberg Y, Huseby Karlsen R, Laudon H, 2018.** Groundwater–surface water interactions across scales in a boreal landscape investigated using a numerical modelling approach. *Journal of Hydrology* 560, 184–201.
- Jutebring Sterte E, Lidman F, Balbarini N, Lindborg E, Sjöberg Y, Selroos J-O, Laudon H, 2021a.** Hydrological control of water quality – Modelling base cation weathering and dynamics across heterogeneous boreal catchments. *Science of the Total Environment* 799, 149101. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149101
- Jutebring Sterte E, Lidman F, Lindborg E, Sjöberg Y, Laudon, H, 2021b.** How catchment characteristics influence hydrological pathways and travel times in a boreal landscape. *Hydrology and Earth System Sciences* 25, 2133–2158.
- Jutebring Sterte E, Lidman F, Sjöberg Y, Ploum S W, Laudon H, 2022.** Groundwater travel times predict DOC in streams and riparian soils across a heterogeneous boreal landscape. *Science of The Total Environment* 849, 157398. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.157398
- Kalinowski M, 2015.** Betongcylinder I-1B med ingjutna metallprover. CBI Betonginstitutet. SKBdoc 1495415 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kalinowski M, 2021.** Betongcylindrar med ingjutna metallprover. RISE. SKBdoc 1933618 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Katrantsiotis C, Norström E, Smittenberg R H, Salonen J S, Pliik A, Helmens K F, 2021.** Seasonal variability in temperature trends and atmospheric circulation systems during the Eemian (Last Interglacial) based on *n*-alkanes hydrogen isotopes from Northern Finland. *Quaternary Science Reviews* 273, 107250. doi:10.1016/j.quascirev.2021.107250
- Kaufhold S, Dohrmann R, Ufer K, Svensson D, Sellin P, 2021.** Mineralogical analysis of bentonite from the ABM5 heater experiment at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. *Minerals* 11, 669. doi:10.3390/min11070669
- Kautsky U, Lindborg T, Valentin J, 2013.** Humans and ecosystems over the coming millennia: a biosphere assessment of radioactive waste disposal in Sweden. *Ambio* 42, 381–526.
- Kegler P, Klinkenberg M, Bukaemskiy A, Murphy G L, Deissmann G, Brandt F, Bosbach D, 2021.** Chromium doped UO₂-based ceramics: synthesis and characterization of model materials for modern nuclear fuels. *Materials* 14, 6160. doi:10.3390/ma14206160
- Keith-Roach M, Höglund L, 2018.** Review of the long-term risks associated with the use of superplasticizers. Posiva Working Report 2017-52, Posiva Oy, Finland.
- Keith Roach M, Shahkarami P, 2021.** Organic materials with the potential for complexation in SFR, the final repository for short-lived radioactive waste. Investigation of new acceptance criteria. SKB R-21-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Keith-Roach M, Lindgren M, Källström K, 2014.** Assessment of complexing agent concentrations in SFR. SKB R-14-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Keith-Roach M, Lindgren M, Källström K, 2021.** Assessment of complexing agent concentrations for the post-closure safety assessment in PSAR SFR. SKB R-20-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kekäläinen P, 2021.** Modelling of the long term diffusion and sorption experiment using an analytically solvable model. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB P-21-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kerleguer V, Jégou C, De Windt L, Broudic V, Jouan G, Miro S, Tocino F, Martin C, 2020.** The mechanisms of alteration of a homogeneous U_{0.73}Pu_{0.27}O₂ MOx fuel under alpha radiolysis of water. *Journal of Nuclear Materials*, 529, 151920. doi:10.1016/j.jnucmat.2019.151920
- King F, 2021a.** Natural analogues and their use in supporting the prediction of the long-term corrosion behaviour of copper-coated UFC. NWMO TR-2021-19, Nuclear Waste Management Organisation, Canada.
- King F, 2021b.** Assessment of the stress corrosion cracking of copper canisters. Posiva Working Report 2021-11, Posiva Oy, Finland.
- King F, Behazin M, 2021.** A review of the effect of irradiation on the corrosion of copper-coated used fuel containers. *Corrosion and Materials Degradation* 2, 678–707.
- King F, Kolář M, 2019.** Copper Sulfide Model (CSM) – model improvements, sensitivity analyses, and results from the Integrated Sulfide Project inter-model comparison exercise. SKB TR-18-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Lilja C, 2013.** Localised corrosion of copper canisters in bentonite pore water. SKB TR-13-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Orazem M E, 2017.** Preliminary report on the development of a kinetic model for the corrosion of copper in pure water. SKBdoc 1602591 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- King F, Kolář M, Puigdomenech I, Pitkänen P, Lilja C, 2021.** Modelling microbial sulfate reduction and the consequences for corrosion of copper canisters. *Materials and Corrosion* 72, 339–347.
- Király M, Horváth M, Nagy R, Vér N, Hózer Z, 2021.** Segmented mandrel tests of as-received and hydrogenated WWER fuel cladding tubes. *Nuclear Engineering and Technology* 53, 2990–3002.
- Kirkkala T, Mikkilä E, 2021.** Safety case for the operating licence application: Description and data of the surface environment 2 – Aquatic environment. Posiva Working Report 2019-12, Posiva Oy, Finland.

- Kolbe T, Marçais J, de Dreuzy J-R, Labasque T, Bishop K, 2020.** Lagged rejuvenation of groundwater indicates internal flow structures and hydrological connectivity. *Hydrological Processes* 34, 2176–2189.
- Konovalenko L, 2012.** Element transport in marine coastal ecosystems – modelling general and element-specific mechanisms. Stockholms universitet.
- Krabbendam M, Hall A M, 2019.** Subglacial block removal – a preliminary analysis of driving and resisting forces under different glaciological scenarios. SKB TR-19-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Krabbendam M, Palamakumbura R, Arnhardt C, Hall A, 2021.** Rock fracturing by subglacial hydraulic jacking in basement rocks, eastern Sweden: the role of beam failure. *GFF* 143, 390–405.
- Krabbendam M, Hall A M, Palamakumbura R M, Finlayson A, 2022.** Glaciotectonic desintegration of roches moutonnées during glacial ripping in east Sweden. *Geografiska Annaler A* 104. doi:10.1080/04353676.2021.2022356
- Krall L, Auqué-Sanz L, Garcia-Orellana J, Trezzi G, Tullborg E-L, Suksi J, Porcelli P, Andersson P, 2020.** Radium isotopes to trace uranium redox anomalies in anoxic groundwater. *Chemical Geology* 531, 119296. doi:10.1016/j.chemgeo.2019.119296
- Kronberg M, Johannesson L-E, Eriksson P, 2020.** Strategy, adaptive design and quality control of bentonite material for a KBS-3 repository. SKB TR-20-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kröhn K-P, 2020.** Checking on the consistency of the ‘two-zone model’ for Task 9B – LTDE-SD. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB P-20-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kuhn M A, Thompson L M, Winder J C, Braga L P P, Tanentzap A J, Bastviken D, Olefeldt D, 2021.** Opposing effects of climate and permafrost thaw on CH₄ and CO₂ emissions from northern lakes. *AGU Advances* 2, e2021AV000515. doi:10.1029/2021AV000515
- Kumar R S, Podlech C, Grathoff G, Warr L N, Svensson D, 2021.** Thermally induced bentonite alterations in the SKB ABM5 hot bentonite experiment. *Minerals* 11, 1017. doi:10.3390/min11091017
- Kumblad L, Kautsky U, 2004.** Models for transport and fate of carbon, nutrients and point source released radionuclides to an aquatic ecosystem. SKB TR-04-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kärnavfallsrådet 2022.** Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2022: samhället, tekniken och etiken. Stockholm: Regeringskansliet. (SOU 2022:7)
- Köhler S J, Lidman F, Laudon H, 2014.** Landscape types and pH control organic matter mediated mobilization of Al, Fe, U and La in boreal catchments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 135, 190–202.
- Könönen M, Malm R, 2021.** Hållfasthetsutredning: betongtankar BTF (SFR-SKB). DokumentID DMG1008901 V2.0, Vattenfall AB. SKBdoc 1942553 ver 1.0. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerblad B, Rogers P, Vogt C, Mårtensson P, 2017.** Utveckling av konstruktionsbetong till kassunerna i 2BMA. SKB R-17-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerbäck R, Sundh M, Svedlund J-O, Johansson H, 2005.** Forsmark site investigation. Searching for evidence of late- or postglacial faulting in the Forsmark region. Results from 2002–2004. SKB R-05-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lahdenperä A-M, Kuusisto J, 2021.** Safety case for the operating licence application: Description and data of the surface environment 1 – Overburden properties and sorption. Posiva Working Report 2019-11, Posiva Oy, Finland.
- Lanyon G W, Davy P, Dershowitz W S, Finsterle S, Gylling B, Hyman J D, Neretnieks I, Uchida M, 2021.** Pragmatic validation approach for geomechanics, flow, and transport models in fractured rock masses. I Proceedings of the 3rd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, 21–25 juni 2021. Paper ARMA-DFNE-21-2369.
- Laudon H, Hasselquist E M, Peichl M, Lindgren K, Sponseller R, Lidman F, Kuglerová L, Hasselquist N J, Bishop K, Nilsson M B, Ågren A M, 2021.** Northern landscapes in transition: Evidence, approach and ways forward using the Krycklan Catchment Study. *Hydrological Processes* 35, e14170. doi:10.1002/hyp.14170

- Lavoine E, Davy P, Darcel C, Munier R, 2020.** A discrete fracture network model with stress-driven nucleation: impact on clustering, connectivity, and topology. *Frontiers in Physics* 8. doi:10.3389/fphy.2020.00009
- Lavoine E, Darcel C, Davy P, Mas Ivars D, 2021.** An analysis of fracture network intersections from DFN models and data: density distribution, topology, and stereology. I Proceedings of the 3rd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, 21–25 juni 2021. Paper ARMA-DFNE-21-235.
- Ledesma J L J, Futter M N, Blackburn M, Lidman F, Grabs T, Sponseller R A, Laudon H, Bishop K H, Köhler S J, 2018.** Towards an improved conceptualization of riparian zones in boreal forest headwaters. *Ecosystems* 21, 297–315.
- Le Goc R, Pinier B, Darcel C, Lavoine E, Doolaeghe D, de Simone S, de Dreuzy J-R, Davy P, 2019.** DFN.lab: software platform for Discrete Fracture Network models. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, december 2019, H41H-1778.
- Leijon G, Ahlström J, Andersson-Östling H C M, 2018.** In situ hydrogen charging of OFP copper during creep. SKB R-17-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lemire R J, Palmer D A, Taylor P, Schlenz H, Ragoussi M-E, Costa D, Martinez J, 2020.** Chemical thermodynamics. Vol. 13B, Chemical thermodynamics of iron, Part 2. Boulogne-Billancourt, France: OECD Nuclear Energy Agency.
- Li B, Mo Y, Zou L, Liu R, Cvetkovic V, 2020.** Influence of surface roughness on fluid flow and solute transport through 3D crossed rock fractures. *Journal of Hydrology* 582, 124284. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124284
- Li J, Maier A C, Jonsson M, 2019.** Stability of studdite in aqueous suspension: impact of HCO_3^- and ionizing radiation on the dynamics of dissolution. *ACS Applied Energy Materials* 3, 352–357.
- Li J, Szabó Z, Jonsson M, 2021.** Meta-studdite stability in aqueous solutions. Impact of HCO_3^- , H_2O_2 and ionizing radiation on dissolution and speciation. *Dalton Transactions* 50, 6568–6577.
- Li X, Meng S, Puhakka E, Ikonen J, Liu L, Siitari-Kauppi M, 2020.** A modification of the electromigration device and modelling methods for diffusion and sorption studies of radionuclides in intact crystalline rocks. *Journal of Contaminant Hydrology* 231, 103585. doi:10.1016/j.jconhyd.2019.103585
- Libby S, Hartley L, Turnbull R, Cottrell M, Bym T, Josephson N, Munier R, Selroos J-O, Mas Ivars D, 2019.** Grown Discrete Fracture Networks: a new method for generating fractures according to their deformation history. The ARMA 53rd US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, New York, juni 2019. ARMA 19–1559.
- Lidman F, 2009.** Radionuclide profile from Klarebäcksmossen (PSM006562) analysed by gamma spectrometry and ICP-AES. SKB TR-06-37, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lidman F, 2013.** Radionuclide transport in the boreal landscape: uranium, thorium and other metals in forests, wetlands and streams. Doktorsavh. Umeå universitet.
- Lidman F, 2022.** Biogeochemistry of nickel and molybdenum in the biosphere of Forsmark and Simpevarp. SKB TR-22-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lidman F, Peralta-Tapia A, Vesterlund A, Laudon H, 2016.** $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ in a boreal stream network — Relationship to hydrological events, groundwater and scale. *Chemical Geology* 420, 240–250.
- Lidman F, Boily Å, Laudon H, Köhler S J, 2017.** From soil water to surface water – how the riparian zone controls element transport from a boreal forest to a stream. *Biogeosciences* 14, 3001–3014.
- Lidman F, Laudon H, Taberman I, Köhler S, 2019.** Eu anomalies in soils and soil water from a boreal hillslope transect – A tracer for Holocene lanthanide transport? *Geochimica et Cosmochimica Acta* 267, 147–163.
- Lindblom E, Lund B, Tryggvason A, Uski M, Böövarsson R, Juhlin C, Roberts R, 2015.** Microearthquakes illuminate the deep structure of the endglacial Pärvie fault, northern Sweden. *Geophysical Journal International*, 201, 1704–1716.
- Lindborg T (red), 2018.** BIOPROTA. BIOMASS 2020: Interim report. BIOPROTA report, produced in association with IAEA MODARIA II working group 6. SKB R-18-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Lindborg T, Rydberg J, Andersson E, Löfgren A, Lindborg E, Saetre P, Sohlenius G, Berglund S, Kautsky, U, Laudon H, 2020.** A carbon mass-balance budget for a periglacial catchment in West Greenland – Linking the terrestrial and aquatic systems. *Science of The Total Environment* 711, 134561. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134561
- Lindborg T, Brown J, Griffault L, Ikonen A T K, Kautsky U, Sanae S, Smith G, Smith K, Thorne M, Walke R, 2022.** Safety assessments undertaken using the BIOMASS methodology: lessons learnt and methodological enhancements. *Journal of Radiological Protection* 42, 020503. doi:10.1088/1361-6498/ac563c
- Lindgren S, af Ekenstam G, Hildingsson L, Fagerholm R, Sjöland A, Stål J-O, 2019.** Aspects on declared accountancy data for the final spent fuel disposal in Sweden. 41st ESARDA Annual Meeting Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, Stresa, Italien, 14–16 maj 2019.
- Lindström G, Pers C, Rosberg J, Strömqvist J, Arheimer B, 2010.** Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research* 41, 295–319.
- Lord N S, Lunt D, Thorne M, 2019.** Modelling changes in climate over the next 1 million years. SKB TR-19-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lousada C M, Korzhavyi P A, 2020a.** Segregation of P and S impurities to a $\Sigma 9$ grain boundary in Cu. *Metals* 10, 1362. doi:10.3390/met10101362
- Lousada C M, Korzhavyi P A, 2020b.** Hydrogen sorption capacity of crystal lattice defects and low Miller index surfaces of copper. *Journal of Materials Science* 55, 6623–6636.
- Lund B, Buhcheva D, Juhlin C, Munier R, 2016.** Reactivation of an Ancient Shear Zone in the Fennoscandian Shield: The Burträsk Endglacial Fault. AGU Fall Meeting, San Francisco, Kalifornien, 12–16 december 2016, abstract #S53A-2806.
- Lund B, Schmidt P, Shomali Z H, Roth M, 2021.** The modern Swedish National Seismic Network: Two decades of intraplate microseismic observation. *Seismological Research Letters* 92, 1747–1758.
- Lundgren C, Johannesson L-E, 2020.** Optimering av buffertpellets för KBS-3. Laboratorieförsök på fyra olika pellets. SKB R-19-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren A (red), 2010.** The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. SKB TR-10-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren M, Nilsson K, 2019.** Task description of Task 9A – Modelling of REPRO experiments WPDE-1 and WPDE-2. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB P-17-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Löfgren M, Nilsson K, 2020.** Task description of Task 9B – Modelling of LTDE-SD performed at Äspö HRL. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB P-17-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ma F, Kopecky S, Alaerts G, Harada H, Heyse J, Kitatani F, Noguere G, Paradela C, Šalamon L, Schillebeecx P, Tsuchiya H, Wynants R, 2020.** Non-destructive analysis of samples with a complex geometry by NRTA. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 35, 478–488.
- MacIntyre S, Bastviken D, Arneborg L, Crowe A T, Karlsson J, Andersson A, Gålfalk M, Rutgersson A, Podgrajsek E, Melack J M, 2021.** Turbulence in a small boreal lake: Consequences for air–water gas exchange. *Limnology and Oceanography* 66, 827–854.
- Magnusson H, Frisk K, 2017.** Diffusion, permeation and solubility of hydrogen in copper. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion* 38, 65–69.
- Maier A C, 2019.** Dynamics of spent nuclear fuel dissolution: impact of catalysis, matrix composition and time evolution. Doktorsavh. KTH.
- Maier A C, Barreiro Fidalgo A, Jonsson M, 2020a.** Impact of H₂ and consecutive H₂O₂ exposures on the oxidative dissolution of (U_{1-x}Gd_x)O₂ pellets under deep repository conditions for spent nuclear fuel. *European Journal of Inorganic Chemistry* 2020, 1946–1950.

- Maier A C, Kegler P, Klinkenberg, M, Baena A, Finkeldei S, Brandt F, Jonsson M, 2020b.** On the change in UO_2 redox reactivity as a function of H_2O_2 exposure. *Dalton Transactions* 49, 1241–1248.
- Malmberg D, Åkesson M, 2018.** Modelling the interaction between engineered and natural barriers. Task 8 of SKB Task Forces EBS and GWFTS. SKB P-17-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martinez J S, Santillan E-F, Bossant M, Costa D, Ragoussi M-E, 2019.** The new electronic database of the NEA Thermochemical Database Project. *Applied Geochemistry* 107, 159–170.
- Martino T L, 2018.** Electrochemical and corrosion examination of copper under deep geologic conditions for the application of nuclear waste containers. Doktorsavh. The University of Western Ontario, Kanada.
- Martino T, Chen J, Noël J J, Shoesmith D W, 2020.** The effect of anions on the anodic formation of copper sulphide films on copper. *Electrochimica Acta* 331, 135319. doi:10.1016/j.electacta.2019.135319
- Martino T, Guo M, Noël J J, 2021.** Monitoring bentonite porewater chemistry using electrochemical sensors. SKB R-20-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martinsson Å, Wu R, Sandström R, 2009.** Influence of hydrogen on mechanical properties of nodular cast iron. KIMAB-2009-118, Swerea KIMAB AB.
- Masoumi H, Saydam S, Hagan P C, 2015.** Unified size-effect law for intact rock. *International Journal of Geomechanics* 16. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000543
- Matsuno K, Matsunaga H, Endo M, Yanase K, 2012.** Effect of hydrogen on uniaxial tensile behaviours of a ductile cast iron. *International Journal of Modern Physics: Conference Series* 6, 407–412.
- Mattsson E, Andersson J, Sabel U, Jakowlew G, Johansson T, Bollmark L, 2018.** Jordbrukets behov av vattenförsörjning. Rapport 2018:18, Jordbruksverket, Jönköping.
- McCalpin J, 2013.** Seismology – Post-glacial seismicity and paleoseismology at Forsmark. Technical Note 2013:34, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Meng S, 2020.** Solute transport in fractured rocks: Analysis of analytical solutions and determination of transport parameters. Doktorsavh. KTH.
- Meng S, Moreno L, Neretnieks I, Liu L, 2020.** Modelling matrix diffusion in Task 9B – LTDE-SD. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB P-20-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Milena-Pérez A, Bonales L J, Rodríguez-Villagra N, Fernández S, Baonza V G, Cobos J, 2021.** Raman spectroscopy coupled to principal component analysis for studying UO_2 nuclear fuels with different grain sizes due to the chromia addition. *Journal of Nuclear Materials* 543, 152581. doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152581
- Mishin O V, Gertsman V Y, Gottstein G, 1997.** Distributions of orientations and misorientations in hot-rolled copper. *Materials Characterization* 38, 39–48.
- Molron J, 2021.** Conditionnement des modèles de réseaux de fractures à des données géologiques et géophysiques pour la réduction des incertitudes dans les modèles d'écoulement et de transport. Doktorsavh. Géosciences Rennes, Université de Rennes 1, Frankrike.
- Molron J, Linde N, Baron L, Selroos J-O, Darcel C, Davy P, 2020.** Which fractures are imaged with Ground Penetrating Radar? Results from an experiment in the Äspö Hardrock Laboratory, Sweden. *Engineering Geology* 273, 105674. doi:10.1016/j.enggeo.2020.105674
- Molron J, Linde N, Davy P, Baron L, Darcel C, Selroos J-O, Le Borgne T, Doolaege D, 2021.** GPR-inferred fracture aperture widening in response to a high-pressure tracer injection test at the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. *Engineering Geology* 292, 106249. doi:10.1016/j.enggeo.2021.106249
- Moon S, Perron J T, Martel S J, Goodfellow B W, Mas Ivars D, Hall A, Heyman J, Munier R, Näslund J-O, Simeonov A, Stroeven A P, 2020.** Present-day stress field influences bedrock fracture openness deep into the subsurface. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL090581. doi:10.1029/2020GL090581

Moreno L, Neretnieks I, Liu L, 2010. Modelling of erosion of bentonite by gel/sol flow. SKB TR-10-64, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Munier R, Adams J, Brandes C, Brooks G, Dehls J, Einarsson P, Gibbons S, Hjartardóttir Á R, Hogaas F, Johansen T A, Kvaerna T, Mattila J, Mikko H, Müller K, Nikolaeva S B, Ojala A, Olesen O, Olsen L, Palmu J-P, Ruskeeniemi T, Ruud B O, Sandersen P B E, Shvarev S V, Smith C A, Steffen H, Steffen R, Sutinen R, Tassis G, 2020. International database of Glacially Induced Faults. PANGAEA. Tillgänglig: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.922705>

Mårtensson P, 2015. Äspö Hard Rock laboratory. Concrete and Clay. installation report. SKB P-15-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Mårtensson P, 2017. Hållfasthetsegenskaper hos betongkonstruktionerna i 1-2BMA under de första 20 000 åren efter förslutning. SKBdoc 1577237 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Mårtensson P, 2021a. PSU-17: Undersökning av formstagslösning samt material och metod för fyllning av hål i skyddsror för formstag i 2BMA. SKBdoc 1921349 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Mårtensson P, 2021b. Undersökning av betongtanks vattengenomsläpplighet: rapport. SKBdoc 1932575 ver 1.0. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Mårtensson P, Kalinowski M, 2019. Äspö Hard Rock Laboratory. Concrete and Clay. Retrieval and analysis of experiment package #20. SKB P-19-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Mårtensson P, Vogt C, 2020. Concrete caissons for 2BMA. Large scale test of design, material and construction method. SKB TR-20-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Mårtensson P, Luterkort D, Nyblad B, Wimelius H, Pettersson A, Aghili B, Andolfsson T, 2022. SFR förslutningsplan. SKBdoc 1358612 ver 4.0, Svensk kärnbränslehantering AB.

Mörner N-A, 2005. An interpretation and catalogue of paleoseismicity in Sweden. *Tectonophysics* 408, 265–307.

Mörner N-A, Sjöberg R, 2018. Merging the concepts of pseudokarst and paleoseismicity in Sweden: A unified theory on the formation of fractures, fracture caves, and angular block heaps. *International Journal of Speleology* 47, 393–405.

Mörner N-A, Tröften P E, Sjöberg R, Grant D, Dawson S, Bronge C, Kvamsdal O, Sidén A, 2000. Deglacial paleoseismicity in Sweden: the 9663 BP Iggesund event. *Quaternary Science Reviews* 19, 1461–1468.

Nardi A, Idiart A, Trincherro P, de Vries L M, Molinero J, 2014. Interface COMSOL-PHREEQC (iCP), an efficient numerical framework for the solution of coupled multiphysics and geochemistry. *Computers & Geosciences* 69, 10–21.

Narkuniene A, Poskas P, Justinavicius D, 2021. The modeling of laboratory experiments with COMSOL Multiphysics using simplified hydromechanical model. *Minerals* 11, 754. doi:10.3390/min11070754

Natchimuthu S, Sundgren I, Gålfalk M, Klemedtsson L, Crill P, Danielsson Å, Bastviken D, 2015. Spatio-temporal variability of lake CH₄ fluxes and its influence on annual whole lake emission estimates. *Limnology and Oceanography* 61, 13–26.

NDA, 2015. Solubility studies in the presence of polycarboxylate ether superplasticisers. NDA DRP LOT 2: Integrated Waste Management WP/B2/7. Nuclear Decommissioning Authority, Storbritannien.

NDA, 2017. The impact of the use of polycarboxylate ether superplasticisers for the packaging of low heat generating wastes on GDF post-closure safety. Report NDA/RWM/135, Nuclear Decommissioning Authority, Storbritannien.

Neretnieks I, Moreno L, Liu L, 2017. Clay erosion – impact of flocculation and gravitation. SKB TR-16-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Nord M, Eriksson P, Johannesson L-E, Fritzell A, 2020. Full-scale buffer installation test. Test of the behaviour of a segmented buffer during the installation phase. SKB TR-20-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Ochs M, Colàs E, Grivé M, Olmeda J, Campos I, Bruno J, 2014.** Reduction of radionuclide uptake in hydrated cement systems by organic complexing agents: Selection of reduction factors and speciation calculations. SKB R-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- OECD NEA, 2019.** Preservation of records, knowledge and memory (RK&M) across generations. Final report of the RK&M initiative. OECD Nuclear Energy Agency.
- Ojala A E K, Mattila J, Hämäläinen J, Sutinen R, 2019.** Lake sediment evidence of paleoseismicity: Timing and spatial occurrence of late- and postglacial earthquakes in Finland. *Tectonophysics*, 771, 228227. doi:10.1016/j.tecto.2019.228227
- Olesen O, Olsen L, Gibbons S J, Ruud B O, Høgaas F, Johansen T A, Kværna T, 2021.** Postglacial faulting in Norway: Large magnitude earthquakes of the late holocene age. I Steffen H, Olesen O, Sutinen R (red). *Glacially-triggered faulting*. Cambridge: Cambridge University Press, 198–217.
- Olvmo M, 2010.** Review of denudation processes and quantification of weathering and erosion rates at a 0.1 to 1 Ma time scale. SKB TR-09-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- O’Neil G L, Saby L, Band L E, Goodall J L, 2019.** Effects of LiDAR DEM smoothing and conditioning techniques on a topography-based wetland identification model. *Water Resources Research* 55, 4343–4363.
- O’Neill R, Goode J, Hambley D, 2019.** Failed fuel report: Characterisation and secondary alteration products. Deliverable D2.2, DisCo project (Grant Agreement 755443), Euratom Research and Training Programme on Nuclear Energy, Horizon 2020 Framework Programme, European Commission.
- Osterholz H, Turner S, Alakangas L J, Tullborg E-L, Dittmar T, Kalinowski B E, Dopson M, 2022.** Terrigenous dissolved organic matter persists in the energy-limited deep groundwaters of the Fennoscandian Shield. *Nature Communications* 13, 4837. doi:10.1038/s41467-022-32457-z
- Padovani C, Pletser D, Jurkschat K, Armstrong D, Dugdale S, Brunt D, Faulkner R, Was G, Johansson A J, 2019.** Assessment of microstructural changes in copper due to gamma radiation damage. SKB TR-19-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Papaioannou D, Nasyrow R, Gretter R, Fongaro L, Rondinella V, 2020.** PART-A: Mechanical properties of spent nuclear fuel rods. JRC122564, JRC Karlsruhe, European Commission.
- Park D K, Ji S-H, 2018.** Numerical simulation of anomalous observations from an in-situ long-term sorption diffusion experiment in a rock matrix. *Journal of Hydrology* 565, 502–515.
- Park D K, Ji S-H, 2020.** Corrigendum to “Numerical simulation of anomalous observations from an in-situ long-term sorption diffusion experiment in a rock matrix” [*J. Hydrol.*565 (2018) 502–515]. *Journal of Hydrology* 586, 124758. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124758
- Peacock M, Audet J, Bastviken D, Cook S, Evans C D, Grinham A, Holgerson M A, Högbom L, Pickard A E, Zieliński P, Futter M N, 2021.** Small artificial waterbodies are widespread and persistent emitters of methane and carbon dioxide. *Global Change Biology* 27, 5109–5123.
- Pellikka H, Särkkä J, Johansson M, Pettersson H, 2020.** Probability distributions for mean sea level and storm contribution up to 2100 AD at Forsmark. SKB TR-19-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Perrey H, Ros L, Elfman M, Bäckström U, Kristiansson P, Sjöland A, 2021.** Evaluation of the *in-situ* performance of neutron detectors based on EJ-426 scintillator screens for spent fuel characterization. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 1020, 165886. doi:10.1016/j.nima.2021.165886
- Petrone J, Strömgren M, 2020.** Baseline Forsmark – Digital elevation model. SKB R-17-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Petrone J, Sohlenius G, Ising J, 2020.** Baseline Forsmark – Depth and stratigraphy of regolith. SKB R-17-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pliik A, Risberg J, Helmens K F, 2021.** Diatom assemblages from an Eemian palaeolake in Northern Europe with morphological observations of rare *Aulacoseira* sp. resting spores. *Diatom Research* 36, 313–321.
- Pont A, Idiart A, 2022.** Numerical model for the quantification of buffer bentonite mass losses due to expansion, erosion and sedimentation. Posiva SKB Report 13, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Pont A, Coene E, Idiart A, 2020.** Bentonite erosion project. Preliminary study for the numerical simulation of bentonite erosion. SKB P-20-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Posiva, 2013.** Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Terrain and ecosystems development modelling in the Biosphere Assessment BSA-2012. Posiva 2012-29, Posiva Oy, Finland.
- Posiva, 2021a.** Canister evolution. Posiva Working Report 2021-06, Posiva Oy, Finland.
- Posiva, 2021b.** Sulfide fluxes and concentrations in the spent nuclear fuel repository at Olkiluoto – 2021 update. Posiva Working Report 2021-07, Posiva Oy, Finland.
- Posiva, 2021c.** Buffer, backfill and closure evolution. Posiva Working Report 2021-08, Posiva Oy, Finland.
- Posiva SKB, 2017.** Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group. Posiva SKB Report 01, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Posiva SKB, 2018.** Mechanical design analysis for the canister. Posiva SKB Report 04, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Posiva SKB, 2021.** The Integrated Sulfide Project – Summary report. A collaboration project 2014–2018. Posiva SKB Report 09, Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Poteri A, Andersson P, Nilsson K, Byegård J, Skålberg M, Siitari-Kauppi M, Helariutta K, Voutilainen M, Kekäläinen P, Ikonen J, Sammaljärvi J, Lindberg A, Timonen J, Kuva J, Koskinen L, 2018a.** The First Matrix Diffusion Experiment in the Water Phase of the REPRO project: WPDE 1. Posiva Working Report 2017-23, Posiva Oy, Finland.
- Poteri A, Andersson P, Nilsson K, Byegård J, Skålberg M, Siitari-Kauppi M, Helariutta K, Voutilainen M, Kekäläinen P, 2018b.** The Second Matrix Diffusion Experiment in the Water Phase of the REPRO project: WPDE 2. Posiva Working Report 2017-24, Posiva Oy, Finland.
- Potyondy D O, 2007.** Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44, 677–691.
- Potyondy D O, Mas Ivars D, 2020.** Simulating spalling with a flat-jointed material. I Applied Numerical Modeling in Geomechanics 2020: Proceedings, 5th International Itasca Symposium, februari 2020, Paper 03-01. Minneapolis, Minnesota: Itasca.
- Potyondy D O, Vatcher J, Emam S, 2020.** Modeling of Spalling with PFC3D: A quantitative assessment. Report 2-5732-02:20R50, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota.
- Puranen A, Evins L Z, Barreiro A, Roth O, Spahiu K, 2022.** Very high burnup spent fuel corrosion & leaching under hydrogen conditions. *Journal of Nuclear Materials*. doi:10.1016/j.jnucmat.2022.154027
- Qin Z, Daljeet R, Ai M, Harhangi N, Noël J J, Ramamurthy S, Shoosmith D, King F, Keech P, 2017.** The active/passive conditions for copper corrosion under nuclear waste repository environment. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52, 45–49.
- Quiñones J, Arzúa J, Alejano L R, García-Bastante F, Mas Ivars D, Walton G, 2017.** Analysis of size effects on the geomechanical parameters of intact granite samples under unconfined conditions. *Acta Geotechnica* 12, 1229–1242.
- Ragoussi M-E, Costa D, 2019.** Fundamentals of the NEA Thermochemical Database and its influence over national nuclear programs on the performance assessment of deep geological repositories. *Journal of Environmental Radioactivity* 196, 225–231.
- Rashwan T L, Asad M A, Molnar I L, Behazin M, Keech P G, Krol M M, 2022.** Exploring the governing transport mechanisms of corrosive agents in a Canadian deep geological repository. *Science of The Total Environment* 828, 153944. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153944
- Renström P, 2020.** Beräkningar av temperaturen i kopparhöljet och bufferten i förenklade parameterstudier. SKB R-19-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Riba O, Coene E, Silva O, Duro, L, 2020.** Spent fuel alteration model integrating processes of different time-scales. *MRS Advances* 5, 159–166.

Riba O, Coene E, Orlando Silva O, Duro L, 2021. Development of a reactive transport model of spent fuel dissolution under near field environmental conditions. Deliverable D5.5, DisCo project (Grant Agreement 755443), Euratom Research and Training Programme on Nuclear Energy, Horizon 2020 Framework Programme, European Commission.

Rijal D P, Heintzman P D, Lammers Y, Yoccoz N G, Lorberau K E, Pitelkova I, Goslar T, Murguzur F J A, Salonen J S, Helmens K F, Bakke J, Edwards M E, Alm T, Bråthen K A, Brown A G, Alsos I G, 2021. Sedimentary ancient DNA shows terrestrial plant richness continuously increased over the Holocene in northern Fennoscandia. *Science Advances* 7. doi:10.1126/sciadv.abf9557

Rochman D, Vasiliev A, Ferroukhi H, Hursin M, Ichou R, Taforeau J, Simeonov T, 2021. Analysis for the ARIANE GU3 sample: nuclide inventory and decay heat. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies* 7, 14. doi:10.1051/epjn/2021013

Roth O, Askeljung C, Puranen A, Johnson K, Jädernäs D, Barreiro Fidalgo, A. Evins L Z, Spahiu K, 2021. Investigation of secondary phases formed during long-term aqueous leaching of spent nuclear fuel. *MRS Advances* 6, 90–94.

Rudberg D, Duc N T, Schenk J, Sieczko A K, Pajala G, Sawakuchi H O, Verheijen H A, Melack J M, MacIntyre S, Karlsson J, Bastviken D, 2021. Diel variability of CO₂ emissions from northern lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126, e2021JG006246. doi:10.1029/2021JG006246

Saceanu M C, Paluszny A, Zimmerman R W, Mas Ivars D, 2020a. Numerical modelling of spalling around a nuclear waste storage deposition borehole using a fracture mechanics approach. 54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, paper ARMA-2020-1396.

Saceanu M C, Paluszny A, Zimmerman R W, Mas Ivars D, 2020b. Thermo-mechanical modelling of spalling failure around deposition boreholes in underground nuclear waste repositories. International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media (CouFrac 2020), Seoul, Sydkorea, november 2020.

Saetre P, Nordén S, Keesmann S, Ekström P A, 2013. The biosphere model for radionuclide transport and dose assessment in SR-PSU. SKB R-13-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sahiluoma P, Yagodzinskyy Y, Forsström A, Hänninen H, Bossuyt S, 2021. Hydrogen embrittlement of nodular cast iron. *Materials and Corrosion* 72, 245–254.

Sáinz-García A, Sampietro D, Abarca E, García D, Molinero J, 2022. Modelling of radionuclide transport and retention in the regolith above a hypothetical SFL repository location in the Laxemar area. SKB-R-20-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Salo T, 2021. Safety case for the operating licence application: Description and data of the surface environment 4 – Agriculture. Posiva Working Report 2019-14, Posiva Oy, Finland.

Salonen J S, Sánchez-Goñi M F, Renssen H, Pliik A, 2021. Contrasting northern and southern European winter climate trends during the Last Interglacial. *Geology* 49, 1220–1224.

Sandén T, Börgesson L, Nilsson U, Dueck A, 2017. Full scale Buffer Swelling Test at dry backfill conditions in Äspö HRL. In situ test and related laboratory tests. SKB TR-16-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandström R, Lousada C M, 2021. The role of binding energies for phosphorus and sulphur at grain boundaries in copper. *Journal of Nuclear Materials* 544, 152682. doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152682

Sandström R, Sui F, 2021. Modeling of tertiary creep in copper at 215 and 250 °C. *Journal of Engineering Materials and Technology* 143, 031001. doi:10.1115/1.4049241

Sarnet J, 2022. Några mätningar av segjärns åldring. SKB R-22-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sawakuchi H O, Martin G, Peura S, Bertilsson S, Karlsson J, Bastviken D, 2021. Phosphorus regulation of methane oxidation in water from ice-covered lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126, e2020JG006190. doi:10.1029/2020JG006190

Schenk F, Wohlfarth B, 2019. The imprint of hemispheric-scale climate transitions on the European climate during the last deglaciation (15.5 ka to 9 ka BP). SKB TR-18-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Schenk J, Sawakuchi H O, Siczko A K, Pajala G, Rudberg D, Hagberg E, Fors K, Laudon H, Karlsson J, Bastviken D, 2021.** Methane in lakes: variability in stable carbon isotopic composition and the potential importance of groundwater input. *Frontiers in Earth Science* 9, 722215. doi:10.3389/feart.2021.722215
- Schillebeeckx P, Verwerft M, Žerovnik G, Parthoens Y, Pedersen B, Alaerts G, Cools G, Govers K, Paepen J, Varasano G, Wynants R, 2020.** A non-destructive method to determine the neutron production rate of a sample of spent nuclear fuel under standard controlled area conditions. EUR 30379 EN, European Commission.
- Sellin P (red), Åkesson M, Kristensson O, Malmberg D, Börgesson L, Birgersson M, Dueck A, Karnland O, Hernelind J, 2017.** Long re-saturation phase of a final repository. Additional supplementary information. SKB TR-17-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sellin P, Westermark M, Leupin O, Norris S, Gens A, Wiczorek K, Talandier J, Swahn J, 2020.** Beacon: bentonite mechanical evolution. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies* 6, 23. doi:10.1051/epjn/2019045
- Selroos J-O, Mas Ivars D, Munier R, Hartley L, Libby S, Davy P, Darcel C, Trincherro P, 2022.** Methodology for discrete fracture network modelling of the Forsmark site. Part 1 – Concepts, data and interpretation methods. SKB R-20-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Senior N A, Martino T, Binns J, Keech P, 2021.** The anoxic corrosion behaviour of copper in the presence of chloride and sulphide. *Materials and Corrosion* 72, 282–292.
- Shama, A, Rochman, D, Pudollek, S, Caruso, S, Pautz, A, 2021.** Uncertainty analyses of spent nuclear fuel decay heat calculations using SCALE modules. *Nuclear Engineering and Technology* 53, 2816–2829.
- Sidborn M, Marsic N, Crawford J, Joyce S, Hartley L, Idiart A, de Vries L M, Maia F, Molinero J, Svensson U, Vidstrand P, Alexander R, 2014.** Potential alkaline conditions for deposition holes of a repository in Forsmark as a consequence of OPC grouting. Revised final report after review. SKB R-12-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Siczko A K, Duc N T, Schenk J, Pajala G, Rudberg D, Sawakuchi H O, Bastviken D, 2020.** Diel variability of methane emissions from lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 21488–21494.
- Silva O, Abarca E, Molinero J, Kautsky U, 2015.** An equivalent K_d -based radionuclide transport model implemented in COMSOL Multiphysics® software. I Proceedings of Comsol Conference, Grenoble, Frankrike, oktober 2015.
- Siren T, Hakala M, Valli J, Christiansson R, Mas Ivars D, Lam T, Mattila J, Suikkanen J, 2017.** Parametrisation of fractures – Final report. Posiva 2017-01, Posiva Oy, Finland.
- Sjöland A, 2020.** Decay power and spent fuel characterization for repositories and transport. I Management of spent fuel from nuclear power reactors: learning from the past, enabling the future. Proceedings of an international conference, Wien, 24–28 juni 2019. Wien: IAEA, 235–241.
- SKB, 2007.** Fud-program 2007. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010.** Fud-program 2010. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2016.** Fud-program 2016. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2017.** Svar till SSM på begäran om komplettering kring förspärningsmekanismer för kapseln. SKBdoc 1602500 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2019.** Fud-program 2019. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-11-15.** SKB 2011. Kärntekniska industrins praxis för friklassning av material lokaler och byggnader samt mark. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB R-14-02.** SKB 2015. Handling of biosphere FEPs and recommendations for model development in SR-PSU. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-08-05.** SKB 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-09-01.** SKB 2009. Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase. SDM-Site Laxemar. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-10-14.** SKB 2010. Design, production and initial state of the canister. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-10-46.** SKB 2010. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-10-49.** SKB 2010. Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-10-51.** SKB 2010. Model summary report for the safety assessment SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-11-01.** SKB 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-11-04.** SKB 2013. Site description of the SFR area of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-PSU Forsmark. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-13-05.** SKB 2014a. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-PSU. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-14-01.** SKB 2015. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. Revised edition. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-14-06.** SKB 2014. Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-14-11.** SKB 2014. Model summary report for the safety assessment SR-PSU. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-19-01.** SKB 2019. Post-closure safety for a proposed repository concept for SFL Main report for the safety evaluation SE-SFL. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-19-04.** SKB 2019. Climate and climate-related issues for the safety evaluation SE-SFL. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-19-05.** SKB 2019. Biosphere synthesis for the safety evaluation SE-SFL. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-19-06.** SKB 2019. Radionuclide transport and dose calculations for the safety evaluation SE-SFL. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-19-15.** SKB 2019. Supplementary information on canister integrity issues. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-20-12.** SKB 2020. Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark – Climate and climate-related issues, PSAR version. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB TR-21-10.** SKB 2021. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual report 2020. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKBF/KBS, 1983.** Kärnbränslecykelns slutsteg, Använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.
- Smith C A, Mikko H, Grigull S, 2021.** Glacially induced faults in Sweden: The rise and reassessment of the single-rupture hypothesis. I Steffen H, Olesen O, Sutinen R (red). Glacially-triggered faulting. Cambridge: Cambridge University Press, 218–230.
- Sohlenius G, Svensson M, 2021.** Regolith in wetlands with high nature values. Additional studies. SKB P-21-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Sohlenius G, Saetre P, Nordén S, Grolander S, Sheppard S, 2013a.** Inferences about radionuclide mobility in soils based on the solid/liquid partition coefficients and soil properties. *Ambio* 42, 414–424.
- Sohlenius G, Strömngren M, Hartz F, 2013b.** Depth and stratigraphy of regolith at Forsmark. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sohlenius G, Wilin L, Hedenström A, Karlsson, C, 2019.** Quaternary deposits in the drainage area of Gunnarsboträsket in Forsmark. Stratigraphical and surficial distribution of Quaternary deposits. SKB P-19-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sohlenius G, Becher M, Boman A, 2020.** Regolith in wetlands with high nature values. Physical and chemical properties. SKB P-20-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Soler J M, Neretnieks I, Moreno L, Liu L, Meng S, Svensson U, Iraola A, Ebrahimi H, Trincherro P, Molinero J, Vidstrand P, Deissmann G, Říha J, Hokr M, Vetešník A, Vopálka D, Gvoždík L, Polák M, Trpkošová D, Havlová V, Park D-K, Ji S-H, Tachi Y, Ito T, Gylling B, Lanyon W, 2021a.** Predictive modeling of a simple field matrix diffusion experiment addressing radionuclide transport in fractured rock. Is it so straightforward? *Nuclear Technology* 2008. doi:10.1080/00295450.2021.1988822
- Soler J M, Meng S, Moreno L, Neretnieks I, Liu L, Kekäläinen P, Hokr M, Říha J, Vetešník A, Reimitz D, Višňák J, Vopálka D, Kröhn K P, Tachi Y, Ito T, Svensson U, Iraola A, Trincherro P, Voutilainen M, Deissmann G, Bosbach D, Park D K, Ji S-H, Gvoždík L, Milický M, Polák M, Makedonska N, Kuluris S, Karra S, Viswanathan H, Gylling B, Lanyon G W, 2021b.** Evaluation report of Task 9B based on comparisons and analyses of modelling results for the Äspö HRL LTDE SD experiments. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB TR-20-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Soler J M, Kekäläinen P, Pulkkanen V-M, Moreno L, Iraola A, Trincherro P, Hokr M, Říha J, Vetešník A, Reimitz D, Višňák J, Vopálka D, Gvoždík L, Milický M, Polák M, Fukatsu Y, Ito T, Tachi Y, Svensson U, Park D K, Ji S-H, Gylling B, Lanyon G W, 2021c.** Evaluation report of Task 9C based on comparisons and analyses of modelling results for the ONKALO REPRO-TDE experiment. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB TR-21-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Soler J M, Meng S, Moreno L, Neretnieks I, Liu L, Kekäläinen P, Hokr M, Říha J, Vetešník A, Reimitz D, Višňák J, Vopálka D, Kröhn K-P, Tachi Y, Ito T, Svensson U, Iraola A, Trincherro P, Voutilainen M, Deissmann G, Bosbach D, Park D K, Ji S-H, Gvoždík L, Milický M, Polák M, Gylling B, Lanyon G W, 2022.** Modelling of the LTDE-SD radionuclide diffusion experiment in crystalline rock at the Äspö Hard Rock Laboratory (Sweden). *Geologica Acta* 20. doi:10.1344/GeologicaActa2022.20.7
- Soroka I, Chae N, Jonsson M, 2021.** On the mechanism of γ -radiation-induced corrosion of copper in water. *Corrosion Science* 182, 109279. doi:10.1016/j.corsci.2021.109279
- Spahiu K, 2021.** Residual water and gases in a KBS-3 canister and their effect on post-closure safety. SKB TR-21-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SSM, 2019.** Granskningsrapport – Utbyggnad och fortsatt drift av SFR. Rapport 2019:18, Del III, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2021a.** SSM's external experts' review of SKB's safety evaluation SE-SFL. Report 2021:13, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2021b.** Remissvar – Ärenden om tillåtlighet enligt miljöbalken och tillstånd enligt lagen om kärnteknisk verksamhet till anläggningar i ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall. SSM2021-6205-2, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2021c.** Granskning av SKB:s Säkerhetsvärdering av slutförvarskoncept för långlivat låg- och medelaktivt avfall. SSM2019-10359-17, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- SSM, 2021d.** Metoder för överföring av information och kunskap om slutförvaret för radioaktivt avfall. SSM2021-3348-2, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Steffen H, Olesen O, Sutinen R (red), 2021.** Glacially-triggered faulting. Cambridge: Cambridge University Press.

- Stephens M B, Simeonov A, 2015.** Description of deformation zone model version 2.3, Forsmark. SKB R-14-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stigsson M, 2019.** Structural uncertainties of rock fractures and their effect on flow and tracer transport. Doktorsavh. KTH.
- Stock B, 2020.** Numerical and experimental analysis of fluid flow in fracture replicas with variable aperture. Examensarbete. Stockholms universitet.
- Stock B, Frampton A, 2021.** Flow experiments through 3D printed rough-walled single-fracture replicas. I Proceedings of the 3rd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, 21–25 juni 2021. Paper ARMA-DFNE-21-2340.
- Suksi J, Tullborg E-L, Pidchenko I, Krall L, Sandström B, Kaksonen K, Vitova T, Kvanshnina K, Göttlicher J, 2021.** Uranium remobilisation in anoxic deep rock-groundwater system in response to late Quaternary climate changes – Results from Forsmark, Sweden. *Chemical Geology* 584, 120551. doi:10.1016/j.chemgeo.2021.120551
- Sun H, Mašin D, Najser J, Neděla V, Navrátilová E, 2019.** Bentonite microstructure and saturation evolution in wetting–drying cycles evaluated using ESEM, MIP and WRC measurements. *Géotechnique* 28, 713–726.
- Sundström R, Andersson-Östling H C M, Hagström J, 2020.** Recrystallization of copper with phosphorus and Auger microscopy studies of the phosphorus content. SKB TR-20-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svemar C, Johannesson L-E, Graham P, Svensson D, Kristensson O, Lönnqvist M, Nilsson U, 2016.** Prototype Repository. Opening and retrieval of outer section of Prototype Repository at Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report. SKB TR-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson D, Kalinowski B E, Turner S, Dopson M, 2020.** Activity of sulphate reducing bacteria in bentonite as a function of water availability. SKB TR-20-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson D, Alakangas L, Kalinowski B, Turner S, Dopson M, Ståhle M, 2021.** Local depletion of aqueous manganese and its correlation with manganese oxidizing bacteria and precipitates in the Äspö bedrock. SKB R-21-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson T, 2019.** Measurements and fluxes of volatile chlorinated organic compounds (VOCl) from natural terrestrial sources. Measurement techniques and spatio-temporal variability of flux estimates. SKB TR-18-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson T, Kylin H, Montelius M, Sandén P, Bastviken D, 2021a.** Chlorine cycling and the fate of Cl in terrestrial environments. *Environmental Science and Pollution Research* 28, 7691–7709.
- Svensson T, Bastviken D, Löfgren A, 2021b.** Cl distribution in different terrestrial habitats along hill slope gradients in Forsmark. SKB R-21-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, 2020.** Task 9B – A grain-scale reactive transport model – concepts and tests. Task 9 of SKB Task Force GWFTS – Increasing the realism in solute transport modelling based on the field experiments REPRO and LTDE-SD. SKB P-20-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Svensson U, Löfgren M, Trincherio P, Selroos J-O, 2018.** Modelling the diffusion-available pore space of an unaltered granitic rock matrix using a micro-DFN approach. *Journal of Hydrology* 559, 182–191.
- Svensson U, Voutilainen M, Muuri E, Ferry M, Gylling B, 2019a.** Modelling transport of reactive tracers in a heterogeneous crystalline rock matrix. *Journal of Contaminant Hydrology* 227, 103552. doi:10.1016/j.jconhyd.2019.103552
- Svensson U, Trincherio P, Ferry M, Voutilainen M, Gylling B, Selroos J-O, 2019b.** Grains, grids and mineral surfaces: approaches to grain scale matrix modelling based on X- ray micro-computed tomography data. *SN Applied Sciences* 1, 1277. doi:10.1007/s42452-019-1254-1
- Szabó, Dvinskikh S, Emmer Å, Svenberg L, Wold S, Mårtensson P, 2020.** Äspö Hard Rock Laboratory. Project Concrete and Clay, Degradation of organic materials in cementitious environments. SKB TR-20-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Szenknect S, Alby D, García M L, Wang C, Podor R, Miserque F, Mesbah A, Duro L, Evins L Z, Dacheux N, Bruno J, Ewing R, 2020.** Coffinite formation from UO_{2+x} . *Scientific Reports* 10. doi:10.1038/s41598-020-69161-1
- Söderbäck (red) B, 2008.** Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. Site descriptive modelling. SDM-Site. SKB R-08-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Tachi Y, Ito T, Gylling B, 2021.** A scaling approach for retention properties of crystalline rock: Case study of the in-situ long-term sorption and diffusion experiment (LTDE-SD) at the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden. *Water Resources Research* 57, e2020WR029335. doi:10.1029/2020WR029335
- Taniguchi N, Kawasaki M, 2008.** Influence of sulfide concentration on the corrosion behaviour of pure copper in synthetic seawater. *Journal of Nuclear Materials* 379, 154–161.
- Tasdigh H, 2015.** Assessment of the impact of fiber mass UP2 degradation products on nickel(II) and europium(III) sorption. Examensarbete. KTH.
- Tasi A G, 2018.** Solubility, redox and sorption behavior of plutonium in the presence of α -D-isosaccharinic acid and cement under reducing, alkaline conditions. Doktorsavh. Karlsruhe Institute of Technology.
- Tasi A G, Gaona X, Rabung T, Fellhauer D, Rothe J, Dardenne K, Lützenkirchen J, Grivé M, Colàs E, Bruno J, Källström K, Altmaier M, Geckeis H, 2021.** Plutonium in the isosaccharinate–cement system. *Applied Geochemistry* 126, 104862. doi:10.1016/j.apgeochem.2020.104862
- Taxén C, Flyg J, Bergqvist H, 2019.** Stress corrosion testing of copper in near neutral sulfide solutions. SKB TR-19-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Thiry Y, Tanaka T, Bueno M, Pisarek P, Roulier M, Gallard H, Legout A, Nicolas M, 2022.** Recycling and persistence of iodine 127 and 129 in forested environments: A modelling approach. *Science of The Total Environment* 831, 154901. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.154901
- Thompson C, McMath G, Bäckström U, Charlton W S, Henzl V, Mendoza P, Rael C, Root M, Sjöland A, Trahan A, Trelue H R, 2022.** Improved evaluation of safeguards parameters from spent fuel measurements with the Differential Die-Away (DDA) instrument. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 1029, 166462. doi:10.1016/j.nima.2022.166462
- Toivola M, Haavisto F, 2021.** Safety case for the operating licence application: Description and data of the surface environment 5 – FAUNA. Posiva Working Report 2019-15, Posiva, Oy, Finland.
- Trahan A, McMath G, Mendoza P, Trelue H, Bäckström U, Pöder Balkeståhl L, Grape S, Henzl V, Leyba D, Root A, Sjöland A, 2020.** Results of the Swedish spent fuel measurement field trials with the Differential Die-Away Self-Interrogation Instrument. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 955, 163329. doi:10.1016/j.nima.2019.163329
- Trelue H, McMath G, Trahan A, Favalli A, Burr T, Sjöland A, Bäckström U, 2021.** Spent fuel nondestructive assay integrated characterization from active neutron, passive neutron, and passive gamma. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 988, 164937. doi:10.1016/j.nima.2020.164937
- Trincherio P, Iraola A, 2020.** Models for the assessment of transport of naturally-occurring nuclides in fractured media. *Journal of Hydrology* 580, 124322. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124322
- Trincherio P, Molinero J, Deissmann G, Svensson U, Gylling B, Ebrahimi H, Hammond G E, Bosbach D, Puigdomenech I, 2017.** Implications of grain-scale mineralogical heterogeneity for radionuclide transport in fractured media. *Transport in Porous Media* 116, 73–90.
- Trincherio P, Molinero J, Ebrahimi H, Puigdomenech I, Gylling B, Svensson U, Bosbach D, Deissmann G, 2018.** Simulating oxygen intrusion into highly heterogeneous fractured media using high performance computing. *Mathematical Geosciences* 50, 549–567.
- Trincherio P, Sidborn M, Puigdomenech I, Svensson U, Ebrahimi H, Molinero J, Gylling B, Bosbach D, Deissmann G, 2019a.** Transport of oxygen in granitic rock: role of physical and mineralogical heterogeneity. *Journal of Contaminant Hydrology* 220, 108–118.

- Trincherio P, Sidborn M, Puigdomenech I, Iraola A, Bosbach D, Deissmann G, 2019b.** Groundwater age dating in fractured rock using ^4He data. *Journal of Hydrology X* 4, 100036. doi:10.1016/j.hydroa.2019.100036
- Trincherio P, Painter S, Poteri A, Sanglas J, Cvetkovic V, Selroos J-O, 2020a.** A particle-based conditional sampling scheme for the simulation of transport in fractured rock with diffusion into stagnant water and rock matrix. *Water Resources Research* 56, e2019WR026958. doi:10.1029/2019WR026958
- Trincherio P, Cvetkovic V, Selroos J-O, Bosbach D, Deissmann G, 2020b.** Upscaling of radionuclide transport and retention in crystalline rocks exhibiting micro-scale heterogeneity of the rock matrix. *Advances in Water Resources* 142, 103644. doi:10.1016/j.advwatres.2020.103644
- Trincherio P, Poteri A, Gylling B, Selroos J-O, 2020c.** Modelling the water phase diffusion experiment at Onkalo (Finland): Insights into the effect of channeling on radionuclide transport and retention. *Journal of Hydrology* 590, 125399. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125399
- Trincherio P, Nardi A, Silva O, Bruch P, 2022.** Simulating electrochemical migration and anion exclusion in porous and fractured media using PFLOTRAN^{NP}. *Computers & Geosciences* 166, 105166. doi:10.1016/j.cageo.2022.105166
- Tröjbom M, Grolander S, Rensfeldt V, Nordén S, 2013.** K_d and CR used for transport calculations in the biosphere in SR-PSU. SKB R-13-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Vestøl O, Ågren J, Steffen H, Kierulf H, Tarasov L, 2019.** NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic region. *Journal of Geodesy* 93, 1759–1779.
- Villar M V, Gutiérrez M G, Barrios B C, Álvarez C G, Martínez R I, Martín P L, Missana T, Mingarro M, Morejón J, Olmeda J, Idiart A 2019.** Experimental study of the transport properties of different concrete mixes. SKB P-19-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Villar M V, Iglesias R J, Gutiérrez-Álvarez C, Carbonell B, 2021.** Pellets/block bentonite barriers: Laboratory study of their evolution upon hydration. *Engineering Geology* 292, 106272. doi:10.1016/j.enggeo.2021.106272
- Vogt C, Lagerblad B, Wallin K, Baldy F, Jonasson F, 2009.** Low pH self-compacting concrete for deposition tunnel plugs. SKB R-09-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- von Schenck H, Kautsky U, Gylling B, Abarca E, Molinero J, 2015.** Advancing the modelling environment for the safety assessment of the Swedish LILW repository at Forsmark. *MRS Online Proceedings Library* 1744, 223–228.
- Walke R, Limer L, Shaw G, 2017.** In-depth review of key issues regarding biosphere models for specific radionuclides in SR-PSU. I SSM's external expert's review of SKB's safety assessment SR-PSU – dose assessment, K_d -values and safety analysis methodology. Main review phase. Report 2017-33, Part 2, Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Wang B, Nilsson M B, Eklöf K, Hu H, Ehnvall B, Bravo A G, Zhong S, Åkeblom S, Björn E, Bertilsson S, Skyllberg U, Bishop K, 2020.** Opposing spatial trends in methylmercury and total mercury along a peatland chronosequence trophic gradient. *Science of The Total Environment* 718, 137306. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137306
- Wang B, Zhong S, Bishop K, Nilsson M B, Hu H, Eklöf K, Bravo A G, Åkerblom S, Bertilsson S, Björn E, Skyllberg U, 2021.** Biogeochemical influences on net methylmercury formation proxies along a peatland chronosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 308, 188–203.
- Wendel E, Gordon A, Johansson A J, Svensson D, Bergendal E, 2022.** Analysis of corrosion products on filter housings in the Lasgit field experiment. SKB TR-22-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werme L, 1998.** Design premises for canister for spent nuclear fuel. SKB TR-98-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Williams T, Sanglas J, Trincherio P, Gai G, Painter S L, Selroos J-O, 2021.** Recovering the effects of subgrid heterogeneity in simulations of radionuclide transport through fractured media. *Frontiers in Earth Science* 8, 586247. doi:10.3389/feart.2020.586247
- White B, Ogilvie J, Campbell D M H, Hiltz D, Gauthier B, Chisholm H K H, Wen H K, Murphy P N C, Arp P A, 2012.** Using the cartographic depth-to-water index to locate small streams and associated wet areas across landscapes. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 37, 333–347.

- Wimelius H, 2021.** Kostnadsuppskattning och beräkning av mantimmar för betongförstärkningsarbeten 1BMA. NCC Infrastructure. SKBdoc 1953615 ver 1.0. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wohlfarth B, 2013.** A review of Early Weichselian climate (MIS 5d-a) in Europe. SKB TR-13-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Wood M D, Beresford N A, Howard B J, Copplestone D, 2013.** Evaluating summarised radionuclide concentration ratio datasets for wildlife. *Journal of Environmental Radioactivity* 126, 314-325.
- Wu R, Sandström R, Jin L-Z, 2013.** Creep crack growth in phosphorus alloyed oxygen free copper. *Materials Science & Engineering A* 583, 151–160.
- Wu R, Ahlström J, Magnusson H, Frisk K, Martinsson Å, 2015.** Charging, degassing and distribution of hydrogen in cast iron. SKB R-13-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Yanagisawa O, Lui T S, 1983.** Influence of the structure on the 673 K embrittlement of ferritic spheroidal graphite cast iron. *Transactions of the Japan Institute of Metals* 24, 858–867.
- Yang Q, Chang Z, Messina L, Sandberg N, Castin N, Yousfi A, Toijer E, Thuvander M, Boizot B, Metayer V, Gorse-Pomonti D, Olsson P, 2022.** Cu precipitation in electron-irradiated iron alloys for spent-fuel canisters. *Journal of Nuclear Materials*. doi:10.1016/j.jnucmat.2022.154038
- Young A, Warwick P, Milodowski A, Read D, 2013.** Behaviour of radionuclides in the presence of superplasticiser. *Advances in Cement Research* 25, 32–43.
- Zhang F, Örnek C, Liu M, Müller T, Lienert U, Ratia-Hanby V, Carpén L, Isotahdon E, Pan J, 2021.** Corrosion-induced microstructure degradation of copper in sulfide-containing simulated anoxic groundwater studied by synchrotron high-energy X-ray diffraction and *ab-initio* density functional theory calculation. *Corrosion Science* 184, 109390. doi:10.1016/j.corsci.2021.109390
- Zou L, Cvetkovic V, 2020.** Inference of transmissivity in crystalline rock using flow logs under steady-state pumping: Impact of multiscale heterogeneity. *Water Resources Research* 55, e2020WR027254. doi:10.1029/2020WR027254
- Zou L, Cvetkovic V, Jing L, Mas Ivars D, 2018.** Impact of normal stress caused closure on fluid flow and solute retention in rock fractures. *The International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application (CouFrac)*, Wuhan, Kina, 12–14 november 2018.
- Zou L, Mas Ivars D, Larsson J, Selroos J-O, Cvetkovic V, 2021.** Impact of shear displacement on advective transport in a laboratory-scale fracture. *Geomechanics for Energy and the Environment* (2021), 100278. doi:10.1016/j.gete.2021.100278
- Åkesson M, 2020.** EBS TF – THM modelling. Water transport in pellets-filled slots – evaluation of model contributions. SKB P-20-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, Laitinen H, 2022.** Gas phase composition during the unsaturated period. Status report June 2022. SKBdoc 1983850 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, Kristensson O, Börgesson L, Dueck A, Hernelind J, 2010.** THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, Sandén T, Goudarzi R, Malmberg M, 2019.** Full-scale test of the Dome Plug for KBS-3V deposition tunnels. Monitoring, function tests and analysis of bentonite components. SKB P-18-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Åkesson M, Svensson D, Laitinen H, 2020.** Gas phase composition during the unsaturated period – initial tests. SKB P-20-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Öhrling C, Smith C, 2020.** Sedimentologisk undersökning av misstänkt glacialt inducerad förkastningsbrant. SGU-rapport 2020:21, Sveriges geologiska undersökning.
- Öhrling C, Peterson G, Mikko H, 2018.** Detailed geomorphological analysis of LiDAR derived elevation data, Forsmark. Searching for indicatives of late- and postglacial seismic activity. SKB R-18-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Förkortningar och förklaringar

OAVF	Gemensam avfallsanläggning på Oskarshamnsverket.
ABM	Alternative buffer materials. Alternativa buffertmaterial. Experiment i Äspölaboratoriet där möjliga buffertmaterial undersöks.
Alara	As low as reasonably achievable. Begränsning av stråldoser så långt detta rimligen kan åstadkommas med hänsyn tagen till såväl ekonomiska som samhällsliga faktorer.
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Frankrike.
ATB	Avfallstransportbehållare.
B1	Kärnkraftsreaktor Barsebäck 1.
B2	Kärnkraftsreaktor Barsebäck 2.
Back-end	Omfattar avveckling av kärntekniska anläggningar, hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall samt sanering och återställande av radioaktivt förorenad mark.
BAT	Best Available Technology. Bästa möjliga teknik.
Beacon	Bentonite mechanical evolution. EU-projekt.
BeFo	Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
BFA	Bergrum för mellanlagring av låg- och medelaktivt avfall på Simpevarpshalvön i Oskarshamn.
BHA	Bergssal för historiskt avfall i SFL.
BHK	Bergssal för hårdkomponenter i SFL.
BLA	Bergssal för lågaktivt avfall i SFR. I SFR finns en bergssal för lågaktivt avfall (1BLA) och ytterligare fyra bergssalar (2–5BLA) planeras i den utbyggda delen av SFR.
BMA	Bergssal för medelaktivt avfall i SFR. I SFR finns en bergssal för medelaktivt avfall (1BMA) och ytterligare en bergssal (2BMA) planeras i den utbyggda delen av SFR.
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Ministerium ansvarigt för atomenergi i Tyskland.
BTF	Betongtankförvar i SFR, främst avsett för avvattnad jonbytarmassa.
Brie	Bentonite Rock Interaction. Experiment vid Äspölaboratoriet.
BUND	Business Unit Nuclear Decommissioning inom Vattenfall.
BWR	Boiling water reactor. Kokvattenreaktor. Reaktorerna i Forsmark, Oskarshamn och reaktor 1 i Ringhals är kokvattenreaktorer.
CDLM	Committee on Decommissioning of Nuclear Installations and Legacy Management.
CEC	Cation exchange capacity. Katjonutbyteskapacitet.
Chalmers	Chalmers tekniska högskola.
Clab	Centralt mellanlager för använt kärnbränsle.
Clink	Central anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle.
Comsol	Beräkningsverktyg för modellering och simulering av komplexa fysikbaserade system. Comsol Inc.
CORI	Cement-Organic-Radionuclide interactions.
CR	Koncentrationsfaktorer.
Crud	Chalk River unidentified deposits.
DFN	Discrete fracture network. Diskret spricknätverk.
DisCo	Modern spent fuel dissolution and chemistry in failed container conditions. EU-projekt.
DOC	Dissolved organic carbon. Löst organiskt kol.

Domplu	Dome plug experiment. Fullskaletest i Äspölaboratoriet för att testa och demonstrera det kompletta pluggsystemet.
Enresa	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall samt avveckling av kärnkraftverken i Spanien.
Eurad	European Joint Research Programme on Radioactive Waste Management. EU-program.
F1	Kärnkraftsreaktor Forsmark 1.
F2	Kärnkraftsreaktor Forsmark 2.
F3	Kärnkraftsreaktor Forsmark 3.
Febex	Full-scale Engineered Barriers Experiment. Fullskaligt demonstrationsförsök genomfört i undermarkslaboratoriet i Grimsel, Schweiz.
Formas	Statligt forskningsråd för hållbar utveckling.
F-PSAR	Förberedande preliminär säkerhetsredovisning.
FSW	Friction stir welding. Friktionssvetsning.
GAP	Greenland Analogue Project.
GIS	Geographic information system. Geografiskt informationssystem.
Grasp	Greenland Analogue Surface Project.
IAEA	Internationella kärnenergiorganet.
ICE	Greenland ICE project. Glacialhydrologisk studie som kompletterar studierna i GAP.
ISA	Isosackarinsyra, alternativt isosackarinat beroende på aktuellt pH.
ISO-container	Behållare i storlekar standardiserade av Internationella standardiseringsorganisationen (ISO) vilka kan lastas på järnvägsvagnar, lastbilar och fraktfartyg.
KBS-3-metoden	Metod för slutförvaring av det använda kärnbränslet som bygger på tre skyddsbarriärer: kopparkapslar, bentonitlera och det svenska urberget. KBS-3-metoden har fått sitt namn då den bygger på den tredje rapporten i projektet KärnbränsleSäkerhet.
KBS-3-systemet	De kärntekniska anläggningar med mera som behövs för att genomföra slut förvaring av använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden. KBS-3-systemet består av en gemensam anläggning för mellanlagring och inkapsling av det använda kärnbränslet, ett transport-system för transporter av kapslar med använt kärnbränsle och en slutförvarsanläggning.
K_d	Sorptionskoefficient, fördelningskoefficient.
KSKG	Kärnkraftindustrins säkerhetskoordineringsgrupp.
KSU	Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB.
KTB	Transportbehållare för kapslar med använt kärnbränsle.
KTH	Kungliga Tekniska högskolan.
KTL	Lag (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (kärntekniklagen).
Lasgit	Large scale gas injection test.
LOT	Long term test of buffer material. Experiment i Äspölaboratoriet med syfte att ta reda på hur i första hand bentonitlera uppför sig vid förhållanden som liknar dem i ett slutförvar för använt kärnbränsle.
LTDE-SD	Long term diffusion experiment – Sorption-diffusion. Avslutat experiment i Äspölaboratoriet.
LVDT	Linear Variable Differential Transformer.
Marfa	Migration Analysis of Radionuclides in the Far Field. Beräkningsverktyg för modellering av radionuklidtransport.
MB	Miljöbalk (1998:808).
MiniCan	Miniature Canister Corrosion Experiment. Experiment i Äspölaboratoriet.
MIS	Marina isotopstadier.
MMD	Mark- och miljödombstolen.

Modaria	Modelling and Data for Radiological Impact Assessments. IAEA-projekt.
MODATS	Monitoring Equipment and Data Treatment for Safe Repository Operation and Staged Closure.
Modern2020	Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal. EU-projekt.
MoFrac	Beräkningsverktyg för DFN-modellering.
Mox	Mixed oxide fuel. Blandoxidbränsle.
MKB	Miljökonsekvensbeskrivning.
MSB	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
MX-80	Natriumbentonit från Wyoming, USA.
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Schweiz.
NEA	Nuclear Energy Agency. Ett samarbetsorgan för kärnenergifrågor inom OECD.
NPT	Non-Proliferation Treaty (icke spridningssfördraget).
NWMO	Nuclear Waste Management Organization. Organisation med ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle i Kanada.
O1	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 1.
O2	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 2.
O3	Kärnkraftsreaktor Oskarshamn 3.
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development.
OKG	OKG Aktiebolag.
ONDRAF/ NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Belgien.
Onkalo	Den berganläggning som Posiva uppför i Olkiluoto sedan 2004. Onkalo används för forskning och utveckling, men planeras också utgöra tillfarten till själva slutförvaret.
PAN	Polyakrylonitril.
Posiva	Posiva Oy. Organisation med ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle i Finland.
PPC	Project Performance Center inom Uniper.
PSAR	Preliminär säkerhetsredovisning inför uppförande.
Puram	Public Limited Company for Radioactive Waste Management. Organisation med ansvar för slutförvaring av radioaktivt avfall i Ungern.
PWR	Pressurized water reactor. Tryckvattenreaktor. Reaktorerna R2, R3 och R4 i Ringhals samt Ågestareaktorn är tryckvattenreaktorer.
R1	Kärnkraftsreaktor Ringhals 1.
R2	Kärnkraftsreaktor Ringhals 2.
R3	Kärnkraftsreaktor Ringhals 3.
R4	Kärnkraftsreaktor Ringhals 4.
Redox	En redoxreaktion är en kemisk reaktion där ett ämne reduceras samtidigt som ett annat ämne oxideras.
RISE	Research Institutes of Sweden.
RK&M	Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations. Avslutat projekt inom OECD/NEA.
RWM	Radioactive Waste Management. Organisation med ansvar för omhändertagande av radioaktivt avfall i Storbritannien.
RWMC	Radioactive Waste Management Committee. OECD/NEA.
SAR	Säkerhetsredovisning.
SFC	Spent Fuel Characterisation.

SFL	Slutförvaret för långlivat avfall.
SFR	Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall.
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKC	Svenskt Kärntekniskt Centrum.
SNSN	Svenska nationella seismiska nätet.
SRM	Synthetic rock mass. Modell av en bergvolym med en sannolik fördelning av sprickor i olika skalor.
SR-PSU	Redovisning av säkerhet efter förslutning inför SFR-utbyggnad. Publicerad av SKB i augusti 2015.
SR-Site	Redovisning av säkerhet efter förslutning av Slutförvaret för använt kärnbränsle, publicerad av SKB i mars 2011. Site efter engelskans "site" (plats).
SSL	Strålskyddslagen (2018:396).
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten.
SSMFS	Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling.
STF	Säkerhetstekniska driftförutsättningar.
Sture	Säker och Trygg Utfasning av Reaktor 1 och 2 (Ringhals).
Surao	Správa úložišť radioaktivních odpadů. Myndighet/organisation med ansvar för radioaktivt avfall i Tjeckien.
Suus	Säkerhet under uppförandeskedet av Kärnbränsleförvaret.
Task Force GWFTS	Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes. Internationellt samarbete mellan specialister och modelleringsgrupper kring frågor om grundvattenflöde och transport av lösta ämnen i berget.
Task Force EBS	Task Force on Engineered Barrier Systems. Internationellt samarbete mellan specialister och modelleringsgrupper kring frågor om de tekniska barriärerna i det framtida slutförvaret.
THM	Termiska, hydrauliska, mekaniska (egenskaper, faktorer eller processer).
TB	Transportbehållare för använda bränsleelement.
TK	Transportbehållare hårdkomponenter.
Vinnova	Sveriges innovationsmyndighet.
VTT	Technical Research Centre of Finland Ltd. Teknologiska forskningscentralen VTT. Forskningsinstitut som ägs och kontrolleras av den finska staten.
WAC	Waste acceptance criteria. Acceptanskriterier för avfall.

SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

[skb.se](https://www.skb.se)

